

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra stavebních hmot a hornického stavitelství

**Vliv vysokopecní granulované strusky na vývoj vlastností
cementového betonu**

Influence of the content of granulated blast furnace slag on the
progress of concrete properties

Studentka:

Barbora Šerá

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Martin Vavro, Ph.D.

Zadání bakalářské práce

Student: **Barbora Šerá**

Studijní program: B3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: 3647R019 Stavební hmoty a diagnostika staveb

Téma: **Vliv vysokopecní granulované strusky na vývoj vlastností cementového betonu**
Influence of the content of granulated blast furnace slag on the progress of concrete properties

Zásady pro vypracování:

- 1.Úvod
- 2.Stručný přehled latentně hydraulických a pucolánových příměsí do betonu, jejich vlastností a historického i současného použití v technologii betonu a maltovin
- 3.Granulovaná vysokopecní struska (GVS) – způsob výroby, uplatnění ve stavebnictví
- 4.Charakteristika použitých surovin, popis jejich chemického a fázového složení a granulometrie
- 5.Návrh receptur čerstvého betonu, odpovídající hodnotě sednutí S4 dle ČSN EN 206-1
- 6.Příprava zkušebních těles na bázi GVS a cementu v poměrech cca 0%, 6%, 20%, 30%, 46% a 60% GVS z množství pojiva a stanovení základních vlastností (objemová hmotnost, pevnosti po 2, 7, 28 a 90 dnech zrání, odolnost vůči průsaku tlakové vody, odolnost proti působení vody a CHRL)
- 7.Vyhodnocení provedených experimentů
- 8.Závěr

Množství a rozsah tabulek, grafického zpracování a fotodokumentace bude upřesněn v průběhu zpracování tématu

Seznam doporučené odborné literatury:

- Aitcin, P.-C. Vysokohodnotný beton. Informační centrum ČKAIT, 2005.
Bajza, A., Rouseková, I. Technológia betónu. Jaga, Bratislava, 2006, 190 s.
Pytlík, P. Technologie betonu. VUTIUM Brno, 2000, 346 s.
Svoboda, L. Stavební hmoty. JAGA Group, s.r.o., 2005, Bratislava, 471 s., ISBN 80-8076-007-1.

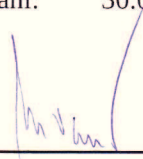
Další literární zdroje dle provedené rešerše (např. z časopisů Beton TKS, Materiály pro stavbu, Stavitel, Minerální suroviny – Surowce mineralne, Silika, CERAMICS – Silikáty, Zpravodaj Silis)

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Vavro, Ph.D.**

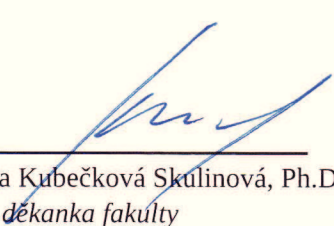
Datum zadání: 31.10.2011

Datum odevzdání: 30.04.2012



Ing. Martin Vavro, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. Ing. Darja Kubečková Skulinová, Ph.D.
děkanka fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 30.4.2012

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že:

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB–TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB–TUO k prezenčnímu. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB–TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB–TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB–TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB–TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 30.4.2012

.....
podpis studenta

Poděkování

Touto cestou bych chtěla poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Vavrovi, Ph.D. za spolupráci a odborné rady. Dále bych ráda poděkovala pracovníkům Laboratoře stavebních hmot FAST VŠB-TU Ostrava, laboratoře Betotech, s.r.o., Ostrava a studentům oboru „Stavební hmoty a diagnostika staveb“ na FAST VŠB-TU Ostrava za pomoc při realizaci experimentální části této práce.

Anotace

Zvyšující se poptávka po stavebních materiálech a současně snižující se množství zásob surovin způsobuje narůstání cen materiálů. Životní prostředí již značně utrpělo průmyslovou výrobou. Proto se svět v současné době stále více přiklání k možnostem, které nabízí opakované využívání průmyslových odpadů ve stavebnictví.

Výroba cementu je energeticky velmi náročná a zatěžuje životní prostředí. Tato práce se soustředí na možnost využití granulované vysokopecní strusky jako pojiva do betonu. Částečná náhrada cementu granulovanou vysokopecní struskou výrazně snižuje pořizovací náklady. Snížení objemu výroby cementu je krokem ke zlepšení životního prostoru každého z nás.

Výsledky této práce by měly prokázat příznivý vliv přídavku vysokopecní granulované strusky na užité vlastnosti betonu.

Annotation

Increasing demand for construction materials and decreasing amount of raw resources causes price rises of materials. The environment is already significantly damaged by industrial production. Hence the world industry is currently more inclined to the possibilities which are offered by secondary materials from industry.

Cement production is very energetically expensive and burden on the environment. This work is focused on utilization of blast furnace slag as binder in concrete. Partial replacement of cement with blast furnace slag decreases the cost. Reduction of cement production leads to improvement of living environment each of us.

The results of this work should show a positive effect of addition of blast furnace slag on resistance properties of concrete.

Klíčová slova

Beton, vlastnosti betonu, vysokopecní granulovaná struska, druhotné suroviny.

Key words

Concrete, properties of concrete, blast furnace slag, secondary raw materials.

Obsah

Seznam použitého značení	9
1. Úvod	10
2. Beton a jeho složení	11
2.1. Kamenivo	13
2.2. Pojivo	20
2.3. Přísady	23
2.4. Příměsi	25
3. Strusky	31
3.1. Výroba vysokopecní strusky	32
3.2. Vysokopecní strusky	42
4. Zkoušení pevnosti cementu a strusky	44
4.1. Příprava malt a zkušebních těles	44
4.2. Stanovení pevnosti zkušebních těles	47
5. Zkoušení čerstvého betonu	51
5.1. Návrh receptury čerstvého betonu	51
5.2. Příprava čerstvého betonu	53
5.3. Stanovení konzistence čerstvého betonu	54
5.4. Stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu	56
5.5. Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu	58
5.6. Příprava a ošetřování zkušebních těles	59
6. Zkoušení ztvrdlého betonu	61
6.1. Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu	61
6.2. Stanovení průběhu pevností betonu v tlaku	63
6.3. Stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou	66
6.4. Stanovení odolnosti proti vodě a CHRL	72
7. Vyhodnocení provedených experimentů	74
8. Závěr	77
Seznam použité literatury	78
Seznam tabulek	80
Seznam obrázků	82

Seznam použitého značení

Značka	Popis	Jednotka
a, b, l, v	Rozměry zkušebních těles	mm
m	Hmotnost	kg
A	Zkušební plocha	mm ²
\underline{A}_c	Obsah vzduchu v čerstvém betonu	%
D	Objemová hmotnost betonu	kg.m ⁻³
F _c	Nejvyšší zatížení v tlaku	N
F _f	Nejvyšší zatížení v tahu ohybem	N
M _H	Hydraulický modul	-
R _c	Pevnost v tlaku	MPa
R _f	Pevnost v tahu za ohybu	MPa
V	Objem	m ³
ρ _a	Odolnost povrchu proti vodě a CHRL	g.m ⁻²

1. Úvod

Stále častěji se lidstvo potýká s otázkou nakládání s průmyslovými odpady. Možnost jejich dalšího využití nabízí řešení tohoto globálního problému.

Odpady z hutní výroby znamenají velkou ekologickou zátěž. Využívání vysokopecní strusky má pro stavební odvětví velký význam. Při správném způsobu zpracování je výhodné její použití jako latentně hydraulického pojiva. V České republice se v současné době snížil počet provozoven vysokých pecí pouze na dvě, tj. Třinecké železářny a ArcelorMittal Ostrava. Přesto je produkce vysokopecní strusky natolik vysoká, aby z ekologického hlediska představovala zátěž, a zároveň dostatečně vysoká, aby skýtala nové možnosti pro technologii betonu.

V současné době je nejužívanějším pojivem cement. Jeho výroba je energeticky a finančně náročná. Energie, jež je nutná k výrobě, tvoří až 50 % nákladů. Je neekonomické jej vyvážet do vzdáleností větších než 300 km, což v globálním měřítku znamená vysoký počet cementáren. Pouze v EU je okolo 400 pecí na výrobu slínku ve skoro třech stech výrobnách. Každá tato cementárna navíc zatěžuje životní prostředí. Uvádí se, že cementářský průmysl vyprodukuje 5 % z celkového množství CO_2 emisí. Pro srovnání při výrobě struskového pojiva je množství produkovaného CO_2 ani ne třetinové. Snížení objemu výroby cementu nebo aspoň pozastavení rozšiřování počtu výroben by tedy jistě stálo za snahu.

Využívání alternativních pojiv by mohlo částečně přispět ke snížení této zátěže. Budou-li navíc využívány zdroje, jenž za běžných podmínek tvoří odpady, a jsou tedy samy ekologickou zátěží, pak bude jejich využití více efektivní. Nižší výrobní náklady na tato alternativní pojiva a tím i jejich nižší prodejní cena při srovnatelné nebo i vyšší výsledné kvalitě mohou způsobit zvýšení zájmu o ně.

Cílem této bakalářské práce je seznámení s možností využití latentně hydraulické strusky jako pojiva do betonu a získání vědomostí o jejích vlastnostech a vlivech na výslednou kvalitu betonu.

Laboratorní zkoušky jsou zaměřeny na sledování vývoje pevnosti betonu v průběhu času, odolnosti proti průsaku tlakové vody a odolnosti proti působení chloridů v závislosti na změně procentuálního množství strusky v objemu pojiva. Porovnáním získaných výsledků krátkodobých vlastností je možné prokázat příznivý vliv na vlastnosti betonu.

2. Beton a jeho složení

Přestože je beton obecně považován za novodobý stavební materiál, jeho historie má kořeny ve starověkém Egyptě. Dle dochovaných záznamů byl první prostý beton (tzv. „umělý kámen“) použit v této oblasti kolem roku 3600 př. n. l. na stavbu sloupů. První pokusy o vytvoření vyztuženého betonu pak pochází z doby kolem roku 212 n. l., kdy bylo na stavbu lázní Caracalla Marca Aurelia využito betonu vyztuženého tyčemi z bronzu a železa. V novodobé historii se beton začal používat až ve druhé polovině osmnáctého století, kdy vznikla i první kniha o betonu. [20]

V posledních desetiletích prodělal výzkum betonu mnoho změn. Vývojové technologie se zaměřily především na chemické složení betonu. Byly objeveny chemické a přírodní látky, zlepšující podstatnou měrou kvalitu betonu např. ve smyslu zvýšení pevnosti a odolnosti proti chemickým a mechanickým vlivům nebo dosažení požadovaných vlastností v omezeném časovém intervalu. Pokroku bylo dosaženo také v oblasti zkoumající vlivy úpravy jednotlivých složek betonu před jejich použitím na kvalitu.

Velký důraz se v posledních letech klade na ochranu životního prostředí při výrobě a zpracování a to nejen ve stavebním průmyslu. U betonu se zkoumá především možnost využití recyklátu z asanovaných betonových konstrukcí, omezení spotřeby přírodních a snížení energetické náročnosti výroby.

V současnosti patří beton k nejpoužívanějším stavebním materiálům. Jedná se o kompozitní látku, tvořenou třemi hlavními složkami – plnivem, pojivem a vodou. K dosažení určitých vlastností pak slouží složky vedlejší, kterými jsou příměsi a přísady.

Beton můžeme z hlediska využití označit jako „pružný“ materiál. Ve velkém rozsahu můžeme měnit jeho vlastnosti zajišťující odolnost vůči vlivům prostředí. Jsme schopni z něj vytvořit téměř jakýkoliv tvar. Lze jej využívat pro realizaci monolitických i prefabrikovaných konstrukcí.

V případě monolitických konstrukcí zabudováváme do konstrukce čerstvý beton (ČB), který vpravujeme do připraveného bednění. ČB je plastická hmota, která není schopna přenášet jakékoliv zatížení. Nevýhodou tudíž je technologická přestávka způsobená dobou tuhnutí a tvrdnutí betonu. Nelze zanedbat ani mnohé odchylky od návrhu vzniklé např. nepřesným uložení výztuže do konstrukce. Oproti tomu prefabrikované dílce jsou do místa svého statického působení v konstrukci zabudovány ve stavu, kdy jsou schopny přenášet

zatížení. Jsou-li navíc tyto dílce dováženy na stavbu z výroby, jsou vyráběny s velkou přesností, které na staveništi nikdy není dosaženo.

Beton se vyznačuje především vysokou pevností v tlaku a nízkou pevností v tahu. Většina zdrojů udává, že je pevnost v tahu asi jednou desetinou pevnosti v tlaku. Beton patří k materiálům s vysokou trvanlivostí. Nepůsobí-li na beton degradační vlivy, jeho pevnost se zvyšuje neustále. Po uplynutí doby počátečního rychlého nárůstu pevnosti jsou změny již nepatrné. Takové změny se již nedají pozorovat v průběhu dní, ale registrujeme je v průběhu let.

Vlastností prostého betonu je také křehkost. Spolu s nízkou pevností v tahu nás toto nutí vkládat do tažené části konstrukce namáhané na ohyb ocelovou výztuž, která je schopna přenášet tahové napětí a tím eliminuje nevýhodu prostého betonu. Konstrukce namáhané pouze tahem se z betonu nenavrhují.

K vlastnostem konstrukcí z prostého betonu patří vysoká hmotnost způsobená velkou objemovou hmotností a masivností. Dnešní trend však směřuje k vývoji štíhlejších a lehčích konstrukcí. Objemová hmotnost betonu se běžně pohybuje v rozmezí od 800 do 3000 kg.m⁻³.

Z chemického hlediska je beton vysoce alkalický (zásaditý). Jeho pH dosahuje až hodnoty 13. Takto vysoká alkalita nám zajišťuje dostatečnou ochranu ocelové výztuže proti korozi.

Betony je možné rozdělit dle mnoha kritérií. Zde jsou uvedena dvě nejdůležitější dělení. Dělení betonu dle vyztužení: [30]

- prostý (nevyztužený)
- železobeton (obsahuje ocelové pruty nebo sítě)
- předpjatý
- vláknobeton

Dělení betonu dle objemové hmotnosti: [30]

- lehké ($\rho < 2000 \text{ kg.m}^{-3}$)
- obyčejné ($\rho = 2000 \text{ až } 2600 \text{ kg.m}^{-3}$)
- těžké ($\rho > 2600 \text{ kg.m}^{-3}$)

2.1. Kamenivo

Kamenivo je zrnitý materiál, jenž zaujímá až 80 % objemu betonu. Vytváří pevnou kostru s minimální mezerovitostí, obvykle není chemicky aktivní, zlepšuje trvanlivost a objemovou stabilitu a má pozitivní vliv na pevnost betonu. Použití kameniva v betonu má také ekonomické důvody. Cena kameniva je většinou výrazně nižší, než cena cementu. [8, 29]

Dle původu se kamenivo dělí na:

- umělé
- přírodní:
 - těžené
 - drcené
 - těžené předrcené
- recyklované

Dle objemové hmotnosti se kamenivo dělí na: [30]

- těžké: $\geq 3000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- hutné: 2000 až $3000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- pórovité: $< 2000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Dle normy ČSN EN 12620+A1 [16] se kamenivo do betonu dle zrnitosti dělí na:

- hrubé kamenivo:
 - $D/d \leq 2$ nebo $D \leq 11,2 \text{ mm}$
 - $D/d > 2$ nebo $D > 11,2 \text{ mm}$
- drobné kamenivo: $D \leq 4 \text{ mm}$ a $d = 0 \text{ mm}$
- těžené přírodní kamenivo 0/8 mm: $D = 8 \text{ mm}$ a $d = 0 \text{ mm}$
- směs kameniva: $D \leq 45 \text{ mm}$ a $d = 0 \text{ mm}$
- filer jako kamenivo

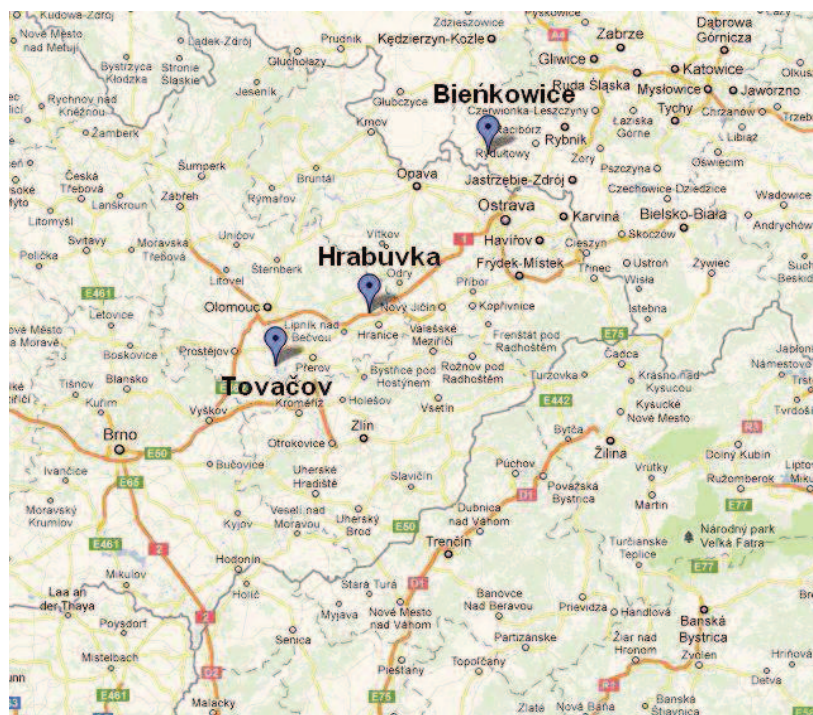
Vhodnost kameniva k použití do betonu je závislá na mnoha vlastnostech. Příkladem takové vlastnosti chemické je obsah škodlivých látek. K nim patří například sírany, reaktivní

oxid křemičitý, chloridy, uhličitany vápenaté nebo hořečnaté, jíly, humusovité látky, bobtnající organické látky a jemné částice menší než 0,063 mm, překročí-li přípustné množství. K mechanickým a fyzikálním vlastnostem patří pórovitost, ovlivňující mrazuvzdornost kameniva, nasákavost, pevnost, sypaná hmotnost nebo objemová hmotnost. [8, 29, 30]

Důležitým faktorem při výběru kameniva je vhodná skladba křivky zrnitosti, která zajišťuje optimální hutnost skladby, čímž lze dosáhnout potřebně nízké mezerovitosti. Sestavení křivky zrnitosti se provádí výpočtem ze síťového rozboru. Dalším posuzovaným faktorem je maximální zrno kameniva, jehož velikost závisí na rozměrech konstrukce, do níž má být beton zabudován, a na způsobu ukládání do konstrukce (např. čerpatelné betony). Zejména u drceného kameniva se posuzuje také tvarový index. Vhodný poměr největšího rozměru zrna kameniva k nejmenšímu má být menší nebo roven 3. [27, 29]

Charakteristiky použitých kameniv

Pro účely této bakalářské práce byly využity tři druhy kameniva. Na Obr. 1 se nachází mapa provozoven, v nichž byla tato kameniva těžena. Jedná se o provozy Tovačov, Hrabůvka a Bienkowice.



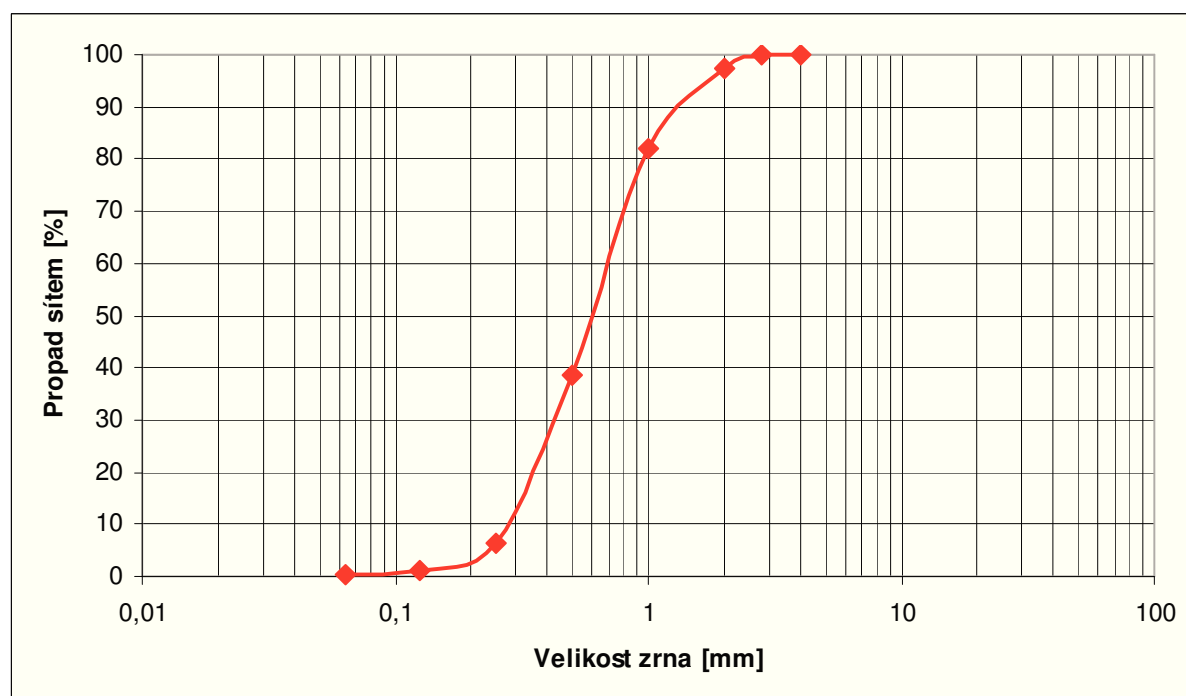
Obr. 1 Mapa těžebních oblastí použitých kameniv

Bieńkowice se nacházejí v Polsku v oblasti česko-polského pohraničí severně od Ostravy. V této části Slezska probíhá těžba říčních sedimentů v povodí Odry.

Použité kamenivo je tedy přírodní těžný písek frakce 0/2. V Tab. 1 jsou uvedeny výsledky síťového rozboru tohoto kameniva. Na Obr. 2 je znázorněna křivka zrnitosti sestavená dle uvedeného síťového rozboru.

Tab. 1 Síťový rozbor kameniva Bieńkowice 0/2

Síto	Zbytek na síti	Zbytek na síti	Propad sítem
mm	g	%	%
22,4	-	-	-
16	-	-	-
11,2	-	-	-
8	-	-	-
5,6	-	-	-
4	0,0	0,00	100,00
2,8	0,0	0,00	100,00
2	21,7	2,57	97,42
1	128,4	15,25	82,18
0,5	367,1	43,59	38,58
0,25	271,9	32,29	6,29
0,125	44,8	5,32	0,97
0,063	4,2	0,50	0,48
Jemné částice	4,0	0,48	0,00
SUMA	842,1	100,00	-



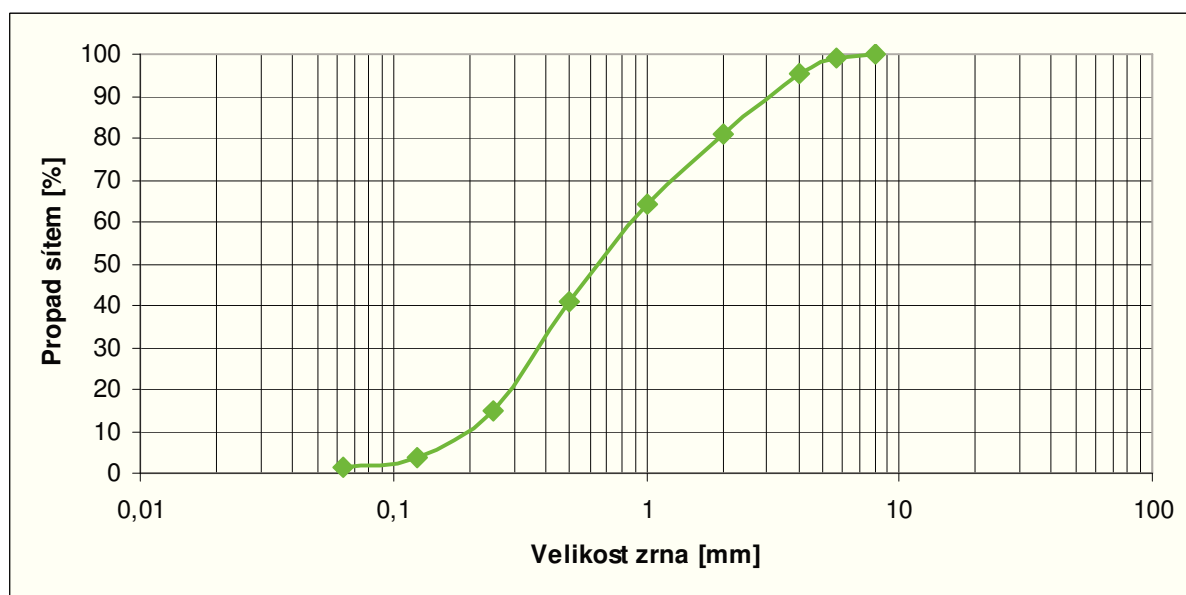
Obr. 2 Křivka zrnitosti kameniva Bieńkowice 0/2

Tovačov se nachází v Olomouckém kraji. Provoz vlastní společnost Českomoravský štěrk. Těžba je zde prováděna také mokrým způsobem za pomoci plovoucích bagrů. Těženým kamenivem jsou přírodní sedimenty, které jsou dostupné ve frakcích 0/4, 4/8, 8/16 a 0/22. [22]

Kamenivem použitým pro účely této práce je přírodní těžený štěrkopísek frakce 0/4. V Tab. 2 jsou uvedeny výsledky síťového rozboru. V Obr. 3 je znázorněna křivka zrnitosti sestavená dle uvedeného síťového rozboru. V Tab. 4 je dále uveden soupis provedených rozborů kameniva včetně identifikace metod, dle kterých byly tyto rozborů provedeny.

Tab. 2 Síťový rozbor kameniva Tovačov 0/4

Síto mm	Zbytek na síť %	Propad sítem %
22,4	-	-
16	-	-
11,2	-	-
8	0,0	100,0
5,6	0,7	99,3
4	3,9	95,4
2,8	-	-
2	14,5	80,9
1	16,8	64,1
0,5	23,0	41,1
0,25	26,3	14,8
0,125	10,9	3,9
0,063	2,6	1,3
Jemné částice	1,3	0,0
SUMA	100,0	-



Obr. 3 Křivka zrnitosti kameniva Tovačov 0/4

Tab. 3 Vlastnosti kameniva Tovačov 0/4

Vlastnost kameniva	Identifikace metody	Jednotka	Hodnota
Jemné částice (f)	ČSN EN 933-1	% hm.	1,3
Cizorodé částice	ČSN 72 1180	% hm.	0,0
Obsah volné slídy	ČSN 72 1180	% hm.	0,0
Lehké znečišťující částice	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,0
Nasákavost (WA24)	ČSN EN 1097-6	% hm.	0,8
Trvanlivost (s. hořečnatý)	ČSN EN 1367-2	% hm.	2,8
Mrazuvzdornost (F)	ČSN EN 1367-1	% hm.	0,1
Humusovitost	ČSN EN 1744-1	-	A
Hmotnost objemová	ČSN EN 1097-6	kg/m ³	2604
Hmotnost volně sypaná	ČSN EN 1097-3	kg/m ³	1467
Hmotnost setřesená	ČSN EN 1097-3	kg/m ³	1767
Mezerovitost volně sypaná	ČSN EN 1097-3	% hm.	43,7
Mezerovitost setřesená	ČSN EN 1097-3	% hm.	32,1
Ekvivalent písku	ČSN EN 933-8	-	84,5
Obsah celkové síry	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,372
Obsah síranů rozp. v kyselině	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,084
Obsah síranů rozp. ve vodě	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,004
Chloridy	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,0001

Hrabůvka se nachází 5 km severovýchodně od Hranic na Moravě v Olomouckém kraji. Provozovna Hrabůvka (viz. Obr. 4) je kamenolom, jejímž vlastníkem je také společnost Českomoravský štěrk přidružená pod Heidelberg Cement Group. Provoz zde byl zahájen kolem roku 1900. Těžba zde tedy probíhá suchým způsobem. Skalní masiv je složen z vrstev různých hornin, z nichž nejkvalitnější je droba, tvořící cca třetinu tohoto masivu. Zbylé horniny jsou zejména prachovce, pískovce a jíly. Kamenolom produkuje širokou škálu drceného kameniva frakcí do velikosti 500 mm. [22]

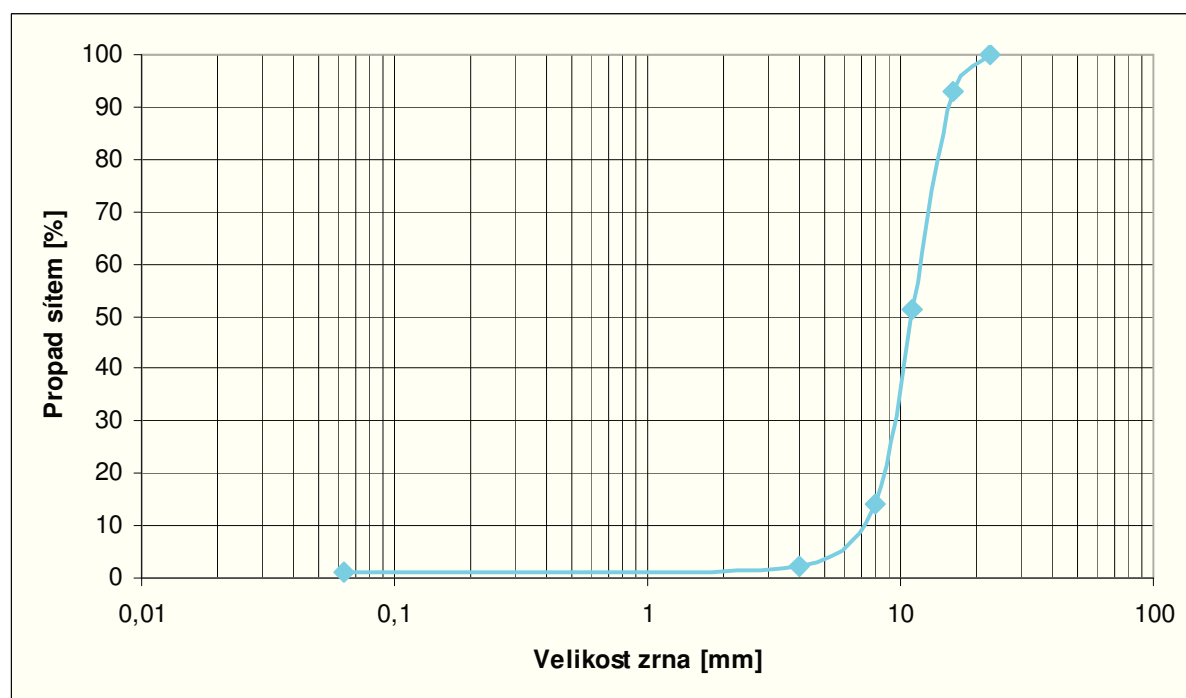


Obr. 4 Kamenolom Hrabůvka

Pro účely této bakalářské práce byla využita droba v podobě přírodního hrubého drceného kameniva frakce 8/16. V Tab. 4. jsou uvedeny výsledky síťového rozboru tohoto kameniva a na Obr. 5 výsledná křivka zrnitosti, sestavená podle tohoto síťového rozboru. V Tab. 5 je dále uveden soupis provedených rozborů kameniva včetně identifikace metod, dle kterých byly tyto rozborů provedeny.

Tab. 4 Síťový rozbor kameniva Hrabůvka 8/16

Síto	Zbytek na síti	Propad sítem
mm	%	%
22,4	0,0	100,0
16	7,2	92,8
11,2	41,4	51,4
8	37,2	14,2
5,6	-	-
4	11,8	2,4
2,8	-	-
2	-	-
1	-	-
0,5	-	-
0,25	-	-
0,125	-	-
0,063	1,1	1,3
Jemné částice	1,3	0,0
SUMA	100,00	-



Obr. 5 Křivka zrnitosti kameniva Hrabůvka 8/16

Tab. 5 Vlastnosti kameniva Hrabůvka 8/16

Vlastnost kameniva	Identifikace metody	Jednotka	Hodnota
Jemné částice (f)	ČSN EN 933-1	% hm.	1,3
Tvarový index (SI)	ČSN EN 933-4	% hm.	23,0
Cizorodé částice	ČSN 72 1180	% hm.	0,0
Lehké znečišťující částice	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,0
Nasákavost (WA24)	ČSN EN 1097-6	% hm.	1,2
Otlukovost (LA)	ČSN EN 1097-2	% hm.	15,2
Trvanlivost (s. hořečnatý)	ČSN EN 1367-2	% hm.	7,5
Mrazuvzdornost (F)	ČSN EN 1367-1	% hm.	0,1
Hmotnost objemová	ČSN EN 1097-6	kg/m ³	2680
Hmotnost volně sypaná	ČSN EN 1097-3	kg/m ³	1344
Hmotnost setřesená	ČSN EN 1097-3	kg/m ³	1518
Mezerovitost volně sypaná	ČSN EN 1097-3	% hm.	49,9
Mezerovitost setřesená	ČSN EN 1097-3	% hm.	43,4
Obsah celkové síry	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,083
Obsah síranů rozp. v kyselině	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,036
Obsah síranů rozp. ve vodě	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,005
Chloridy	ČSN EN 1744-1	% hm.	0,0003
Ohladitelnost PSV	ČSN EN 1097-8	-	64,0

Součtová křivka zrnitosti

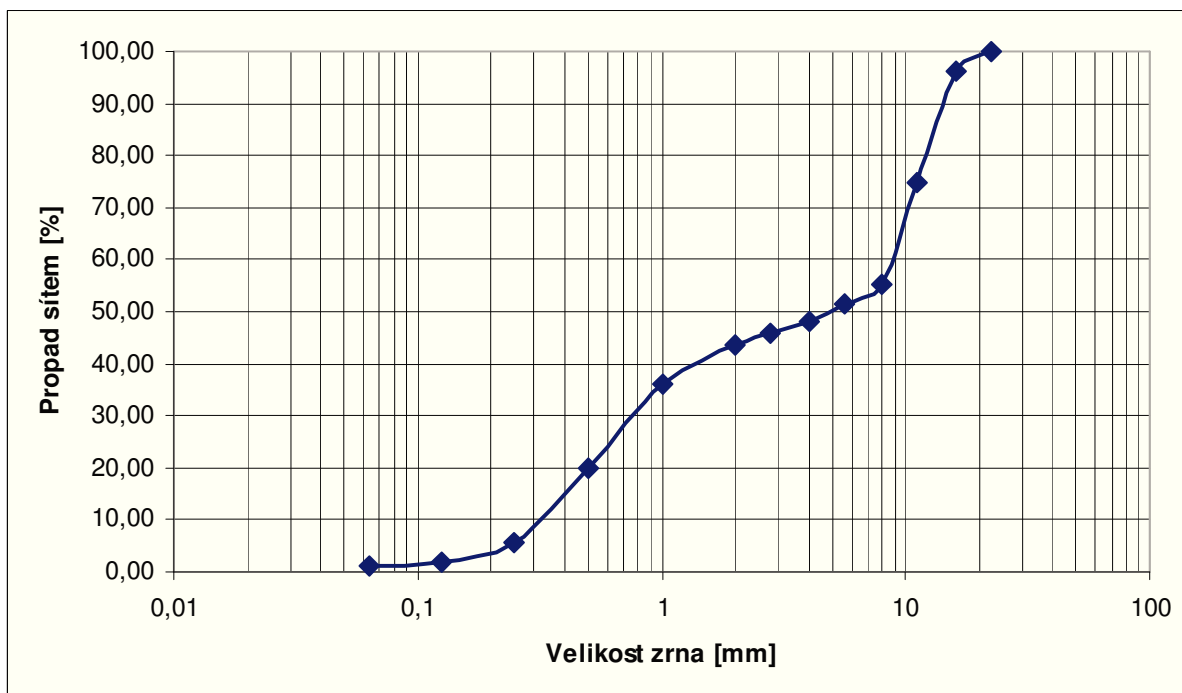
Pro návrh receptury betonu byl zvolen podíl jednotlivých frakcí kameniva ve složení 48 % drobného těženého kameniva v poměru 1:1 a 52 % hrubého drceného kameniva, tj. 24 % frakce 0/2, 24 % frakce 0/4 a 52 % frakce 8/16.

Následně byl proveden součet křivek zrnitosti, který je uveden v Tab. 6. Výsledkem je součtová křivka zrnitosti uvedená na Obr. 6. Vzhledem k vynechání frakce 4/8 se jedná o přerušovanou křivku zrnitosti.

Tab. 6 Součet křivek zrnitosti

Frakce	Podíl	Síto / Propad sítem												
		mm / %												
		0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	2,8	4	5,6	8	11,2	16	22,4
0/2	24	0,5	1,0	6,3	38,6	82,2	97,4	100	100	100	100	100	100	100
0/4	24	1,3	3,9	14,8	41,1	64,1	80,9	86,70	95,4	99,3	100	100	100	100
8/16	52	1,3	1,32	1,35	1,42	1,56	1,84	2,06	2,4	7,12	14,2	51,4	92,8	100
Součtová křivka		1,1	1,9	5,8	19,9	35,9	43,8	45,9	48,1	51,5	55,4	74,7	96,3	100

pozn.: Hodnoty označené červeně jsou doplněny metodou lineární interpolace



Obr. 6 Výsledná součtová křivka zrnitosti

2.2. Pojivo

Pojiva jsou organické nebo anorganické látky, které za určitých podmínek mají schopnost spojovat jiné sypké a kusové materiály. Důležitými vlastnostmi vzniklých směsí je počáteční tvárnost a po zatvrdnutí dostatečná soudržnost a pevnost. Ve stavebnictví se využívají zejména pojiva anorganického původu. [1]

Dle způsobu tuhnutí a tvrdnutí stavební pojiva dělíme na:

- mechanická
- chemická:
 - vzdušná
 - hydraulická

Mezi mechanická pojiva patří například hlína, jíly, asfalty, pájky a některá lepidla. Mechanická pojiva jsou založena na principu tuhnutí a tvrdnutí, při kterém nedochází ke změně chemické podstaty těchto látek, tj. nedochází ke vzniku nových chemických sloučenin. [1]

Oproti mechanickým pojivům při tuhnutí a tvrdnutí pojiv chemických dochází ke vzniku nových minerálních fází, tj. chemická podstata těchto pojiv se mění. Rozdílem mezi chemickými vzdušnými a chemickými hydraulickými pojivy je schopnost po počátečním zatuhnutí tuhnout a tvrdnout také ve vodním prostředí. Hydraulická pojiva tuto schopnost mají, zatímco vzdušná pojiva tuhnou a tvrdnou pouze v prostředí vzdušném. [1, 30]

Mezi vzdušná pojiva se řadí například vzdušné vápno (min. 65 % CaO + MgO), sádra (CaSO_4 a $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$) nebo hořečnatá maltovina. Hydraulickými pojivy jsou hydraulické vápno a všechny druhy cementů. Tato pojiva obsahují tzv. hydraulické oxidy, tj. SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 . Ukazatelem hydraulicity pojiva je tzv. hydraulický modul M_H (1), který udává poměr obsahu zásaditých složek ku obsahu hydraulických oxidů. M_H nabývá hodnot např. > 6 pro vzdušné pojivo s obsahem CaO min. 85 %, < 6 pro hydraulické vápno nebo $< 2,5$ pro portlandský cement. [1, 30]

$$M_H = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (1)$$

Cementy

Nejpoužívanějšími pojivy jsou cementy. Vyrábí se semletím p-slínku a dalších přísad (zejména sádrovce jako regulátoru tuhnutí). Dle normy ČSN EN 197-1 [18] se cementy dělí na:

- cementy pro obecné použití:
 - CEM I: Portlandský cement
 - CEM II: Portlandský cement směsný
 - CEM III: Vysokopeční cement
 - CEM IV: Pucolánový cement
 - CEM V: Směsný cement
- cementy hlinitanové
- cementy speciální

Dle normy [18] se cementy vyrábí ve třech základních třídách pevnosti, tj 32,5, 42,5, 52,5. Národní dodatek navíc rozšiřuje tuto řadu o třídu pevnosti 22,5. Základní řada tříd

pevnosti se vyrábí i v modifikaci Rapid (R). Cementy s touto modifikací rychleji nabývají počátečních pevností.

Portlandský slínek obsahuje čtyři základní slínkové minerály, tj trikalciumsilikát (C_3S), dikalciumsilikát (C_2S), trikalciumaluminát (C_3A) a kalciumaluminátferit (C_2AF nebo C_4AF). Dalšími složkami jsou také volné vápno (CaO) a volný oxid hořečnatý (MgO). Směsné cementy navíc obsahují přísady, kterými mohou být vysokopecní struska, křemičitý úlet, pucolány, popílký, kalcinovaná břidlice a vápenec. [27]

Charakteristika použitého pojiva

Pro účely této bakalářské práce byl využit cement WARTA CEM I 42,5R-NA. Cement pochází od polského výrobce Cementownia Warta. Jedná se o portlandský cement nízkoalkalický s rychlým náběhem počátečních pevností v třídě pevnosti 42,5. V Tab. 7 a 8 jsou uvedeny výsledky fyzikálně-chemické analýzy. *Příloha 1* obsahuje prohlášení o shodě zveřejněné výrobcem.

Tab. 7 Fyzikální vlastnosti cementu WARTA CEM I 42,5R-NA

Vlastnost	Identifikace metody	Jednotka	Požadavky		Výsledek
			Min.	Max.	
<u>Pevnost v tlaku:</u> po 2 dnech po 28 dnech	PN-EN 196-1:2006	MPa	20,0 42,5	- 62,5	28,2 53,6
Záměsová voda			-	-	26,0
<u>Doba tuhnutí:</u> začátek konec	PN-EN 196-3 +A1:2009	min.	60 -	- -	155 200
Objemová stálost			-	10	1,0
Měrný povrch	PN-EN 196-6:1997	$cm^2 \cdot g^{-1}$	-	-	3561

Tab. 8 Chemická analýza cementu WARTA CEM I 42,5R-NA

Vlastnost	Identifikace metody	Jednotka	Požadavky		Výsledek
			Min.	Max.	
Ztráta žháním	PN-EN 196-2:2006	%	-	5,0	1,32
Nerozpustné části		%	-	5,0	0,45
CaO		%	-	-	64,73
MgO		%	-	-	0,85
SiO ₂		%	-	-	19,92
Al ₂ O ₃		%	-	-	5,12
Fe ₂ O ₃		%	-	-	3,23
SO ₃		%	-	4,0	2,95
Na ₂ O _{eq}		%	-	0,60	0,52
Cl		%	-	0,10	0,023

V Příloze 2 je uveden záznam RTG difrakční analýzy, pomocí níž lze získat informace o fázovém složení krystalických látek.

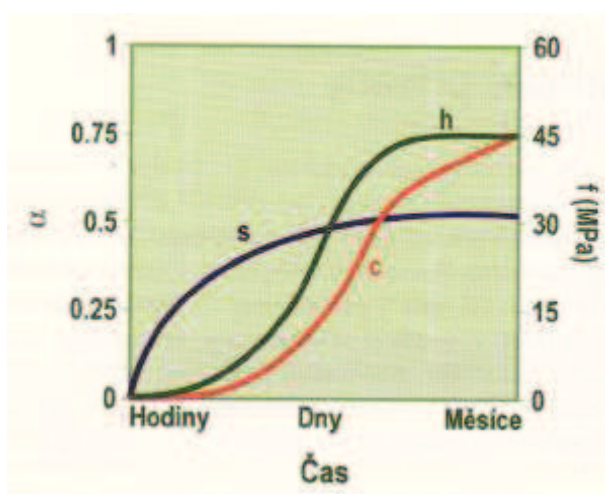
Princip metody: RTG záření rozkmitá elektronové obaly atomů a ty se stanou zdrojem sekundárního koherentního RTG záření, interference sekundárního záření způsobí, že v některých směrech dojde k zesílení intenzity, v jiných k zeslabení. Výsledkem je difrakční obrazec.

Analýza difrakčního obrazce prokázala přítomnost C_3S , C_3A , brownmilleritu (kalciumaluminátferit) a hemihydrátu síranu vápenatého ($CaSO_4 \cdot 0,5 H_2O$).

2.3. Přísady

Přísady jsou chemické látky většinou kapalného, výjimečně práškového charakteru upravující vlastnosti betonu čerstvého nebo ztvrdlého. Přidávají se před nebo v průběhu míchání betonu. Dále jsou uvedeny některé z nejčastěji užívaných přísad. [8, 30]

Urychlující přísady urychlují proces hydratace cementového tmele. Přísada urychlující tuhnutí má vliv na zkrácení doby tuhnutí. Složení urychlovačů tuhnutí je na bázi křemičitanu sodného nebo vodné emulze síranu hlinitého. Přísada pro urychlení tvrdnutí zvyšuje počáteční pevnosti. Dříve se jako urychlovačů tvrdnutí využívalo chloridových solí. Z důvodů negativního vlivu na výztuž se od jejich používání upustilo. Dnes se využívá např. látek bez obsahu chloridů na bázi dusičnanu vápenatého nebo vápenatých solí. [8]



Obr. 7 Vliv urychlovače tuhnutí (s) a tvrdnutí (h) na stupeň hydratace (α) a pevnost v tlaku (f) ve srovnání s referenčním betonem (c) [8]

Zpomalující (retardační) přísady brzdí proces hydratace cementového tmele. Zabraňuje předčasnému přechodu betonu z plastického stavu do tuhé látky. S výhodou jsou tyto přísady využívány pro transport betonu na větší vzdálenost. Mezi zpomalovače tuhnutí se řadí např. polyfenolické trísloviny, sacharóza, oxid zinečnatý (ZnO) a chlorid zinečnatý (ZnCl₂), který ale způsobuje korozi výztuže. [29, 30]

Provzdušňovací přísady jsou látky, které v betonu vytváří jemně rozptýlené uzavřené vzduchové mikropóry o velikosti 10 až 300 µm. Je prokázáno, že provzdušněné betony lépe odolávají vlivu mrazu a mořské vody. Těmito přísadami jsou např. látky na bázi přirozených pryskyřic, solí mastných kyselin nebo hydrolyzované albuminoidy a bílkoviny. [8, 29, 30]

Přísady modifikující viskozitu betonu zamezují odměšování volné vody neboli bleeding, které způsobuje sedimentace tuhých částic betonu. Tyto přísady jsou nejčastěji vyráběny na bázi biopolymerů. [8, 29, 30]

Hydrofobizační přísady jsou látky nanášené na povrch betonu a jiných hydrofilních materiálů nebo přidávané do čerstvého betonu při jeho výrobě, které způsobují, že povrch materiálu odpuzuje vodu. Hydrofobizačními látkami jsou např. mýdla, některé organické kyseliny nebo soli nízkomolekulárních silikonových pryskyřic. [8, 29]

Plastifikační a superplastifikační přísady jsou látky, které redukuje spotřebu vody při zachování zpracovatelnosti betonu. V případě plastifikátorů musí být množství vody sníženo při stejné konzistenci minimálně o 5 %, u superplastifikátorů minimálně o 10 %. Těmito přísady mohou být organické látky, jako např. soli a deriváty lignosulfonátů a hydroxikarboxylových kyselin nebo polyhydroxy sloučeniny. [8, 29]

Dalšími vyráběnými přísadami jsou např. inhibitory alkalicko-křemičité reakce, přísady zamezující smrštění, inhibitory koroze, pěnotvorné, plynotvorné, odpěňovací nebo biocidní přísady. [8, 29]

Charakteristika použité přísady

Pro účely této bakalářské práce byla využita pouze plastifikační přísada Stacheplast, jejímž výrobcem je společnost Stachema Kolín, s.r.o. Plastifikátor Stacheplast je látka na bázi lignosulfonátů. Dle technického listu výrobce zlepšuje tato přísada pevnost, vodotěsnost a odolnost proti klimatickým změnám. *Příloha 3* obsahuje Protokol o vstupní kontrole výrobku Stacheplast se základním hodnocením vlastností. [23]

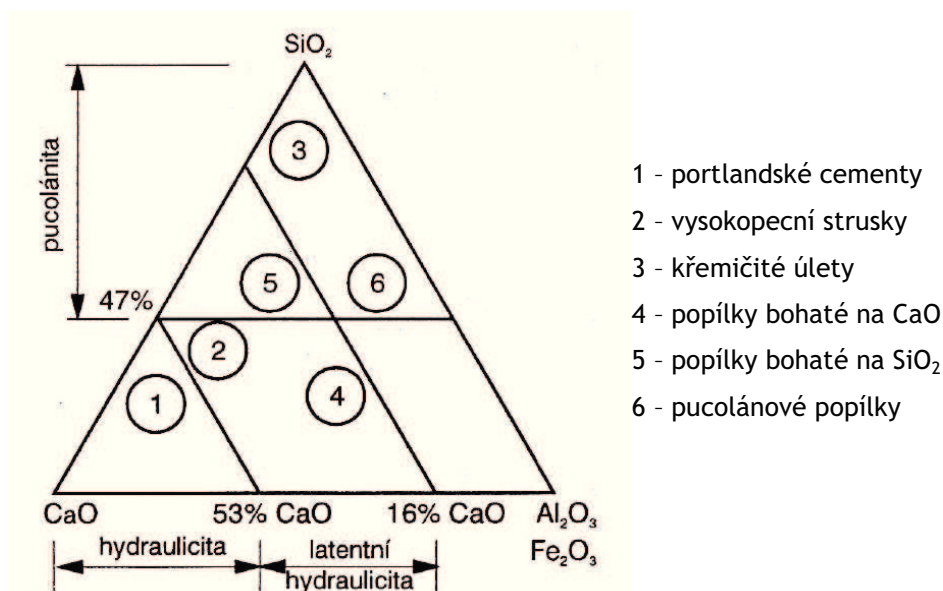
2.4. Příměsi

Příměsi jsou anorganické látky, přidávané do čerstvého betonu obvykle ve formě prášku. Přidáním vhodného množství těchto látek lze dodat speciální nebo pozitivně upravit stávající vlastnosti čerstvého nebo ztvrdlého betonu, a to estetické, mechanické či chemické. Příměsi by zároveň neměly negativně ovlivňovat původní vlastnosti betonu, např. korozivzdornost nebo trvanlivost betonu. [29]

Dle normy ČSN EN 206-1 [19] jsou příměsi rozdělovány do dvou skupin, podle schopnosti podílet se na procesu hydratace:

- druh I: téměř inertní příměsi
- druh II: pucolány a latentně hydraulické příměsi

Inertní příměsi téměř nepřispívají k procesu hydratace betonu, protože téměř nebo vůbec nemají hydraulické vlastnosti. Mezi inertní příměsi patří kamenná moučka, jemně mletý vápenec a pigmenty. [30]



Obr. 8 Pozice hydraulických a pucolánových látek v potrojném diagramu CaO-SiO₂-Al₂O₃ (Fe₂O₃) (Rankin) [29]

Latentně hydraulické a pucolánové příměsi jsou látky, které mohou být částečnou náhradou cementu. Tyto látky mají za určitých podmínek schopnost tuhnout a tvrdnout pod vodou stejně jako cement. Jejich užívání je výhodné zejména z ekonomického hlediska.

Vzhledem k tomu, že se většinou jedná o odpady, je jejich cena výrazně nižší, než cena cementu. Příměsi se do betonu mohou přidávat buď samostatně při míchání nebo ve formě směsných cementů, kdy je příměs semleta se slínkem.

Latentně hydraulické a pucolánové příměsi jsou schopny reagovat za normální teploty s hydroxidem vápenatým (Ca(OH)_2) za vzniku C-S-H gelu. Pucolány obsahují velké množství aktivního SiO_2 a jsou schopny reakce i s dalšími budiči hydraulicity. Rychlost reakce je závislá mimo jiné na jemnosti mletí. Na rozdíl od cementu pucolány nejsou schopny reagovat pouze s vodou. Latentně hydraulické látky s vodou reagují, ale reakce je velmi pomalá. Rozdíly mezi latentně hydraulickými a pucolánovými příměsemi jsou zejména v poměru základních oxidů, který je znázorněn v diagramu na Obr. 8. Chemické složení některých příměsí je uvedeno v Tab. 9. [2, 8, 29]

Tab. 9 Typické chemické složení portlandského cementu, pucolánu, popílku, křemičitého úletu a strusky.

Podle [8]

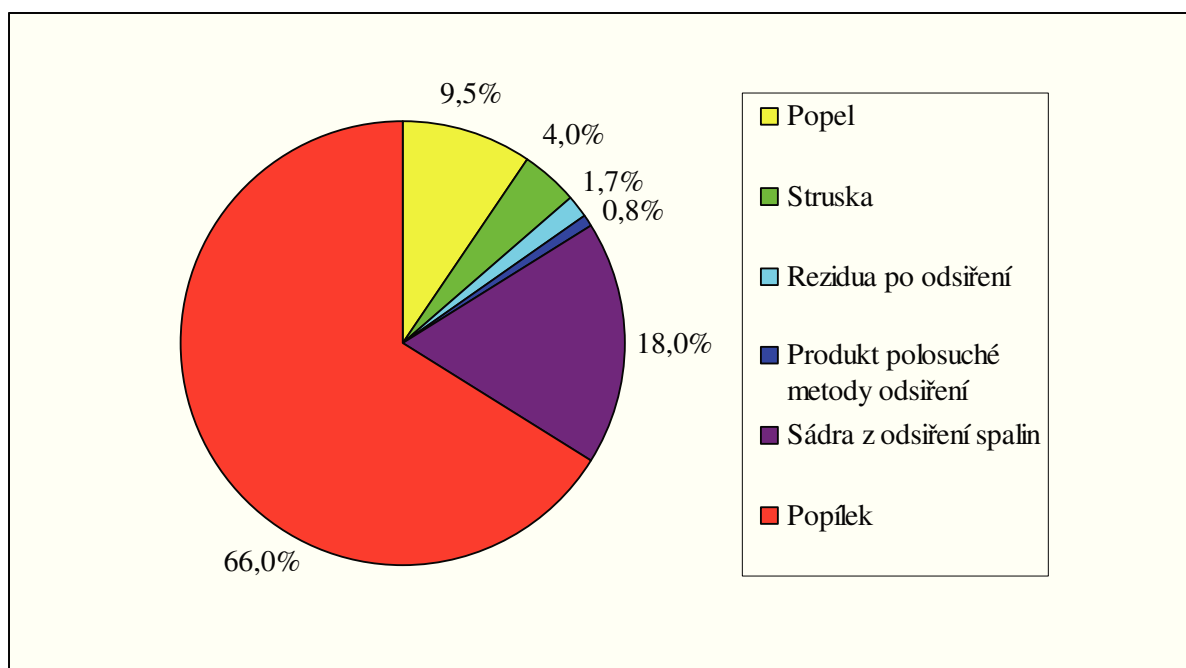
Oxid	Portlandský cement	Přírodní pucolán	Popílek	Křemičitý úlet	Struska
-	%				
SiO_2	23	45	48	94	36
CaO	63	10	5	0,5	44
Al_2O_3	5	18	29	0,5	14
Fe_2O_3	1	9	6	1	1
SO_3	3	-	1	0,2	1
ztráta žháním	2	5	5	2	-

Popílek je vedlejším produktem spalování uhlí, přičemž je při tomto procesu zachycován v tzv. odlučovačích tepelných elektrárnách. Popílek disponuje velkou variabilitou vlastností, zejména chemických a mineralogických. Jeho složení je závislé na druhu spalovaného uhlí a míře jeho znečištění. Popílků z černého uhlí mají stabilnější vlastnosti než popílků z uhlí hnědého. Významným ovlivňujícím faktorem je také zdroj popílku. [2, 29]

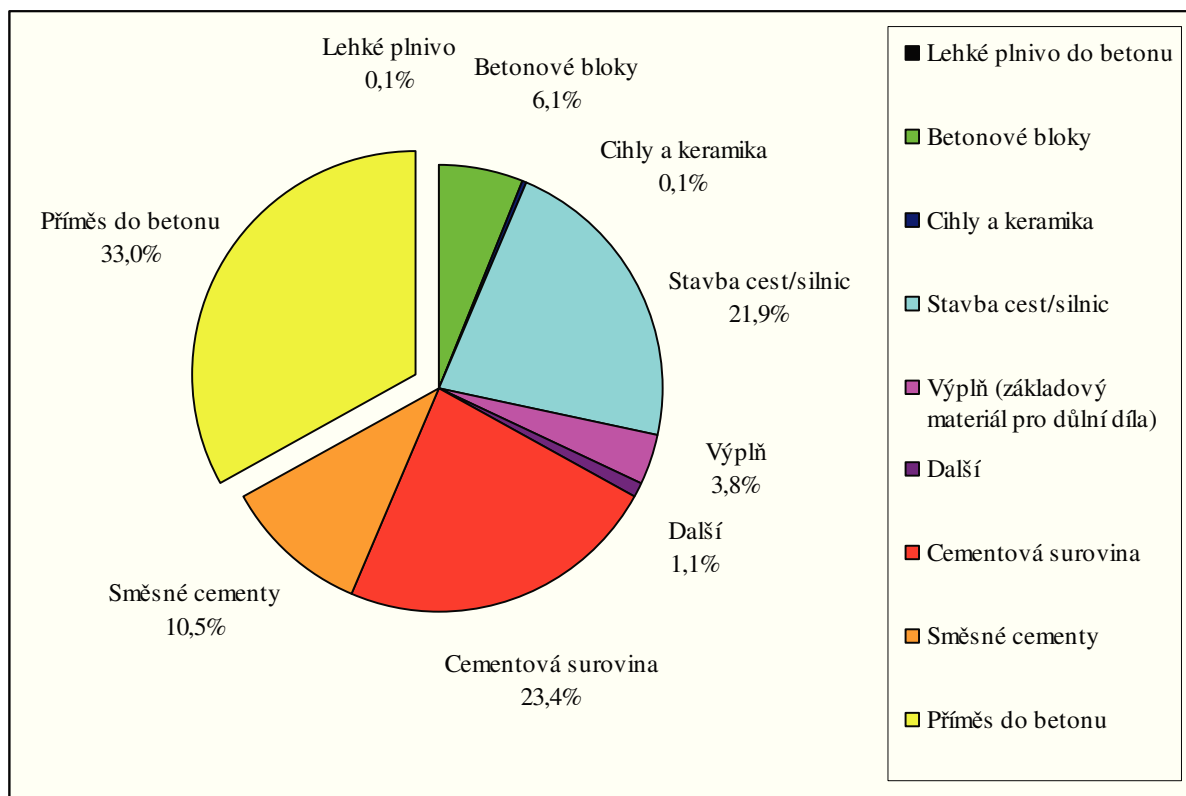
„Uhlí z jednoho zdroje užívané ve stejné elektrárně bude poskytovat téměř stejný popílek, avšak chemické složení popílků z různých elektráren se značně liší.“ [2, str. 99]

Popílků jsou látky světle šedé až černě barvy s velikostí zrna 0,1 až 100 μm . Zrna popílku mají téměř kulovitý tvar. Popílků mohou mít vlastnosti i latentně hydraulické,

ale častěji mají vlastnosti pucolánové. Mají-li mít vůbec tyto vlastnosti, musí obsahovat vysoké množství skelné fáze. [2, 8, 21]



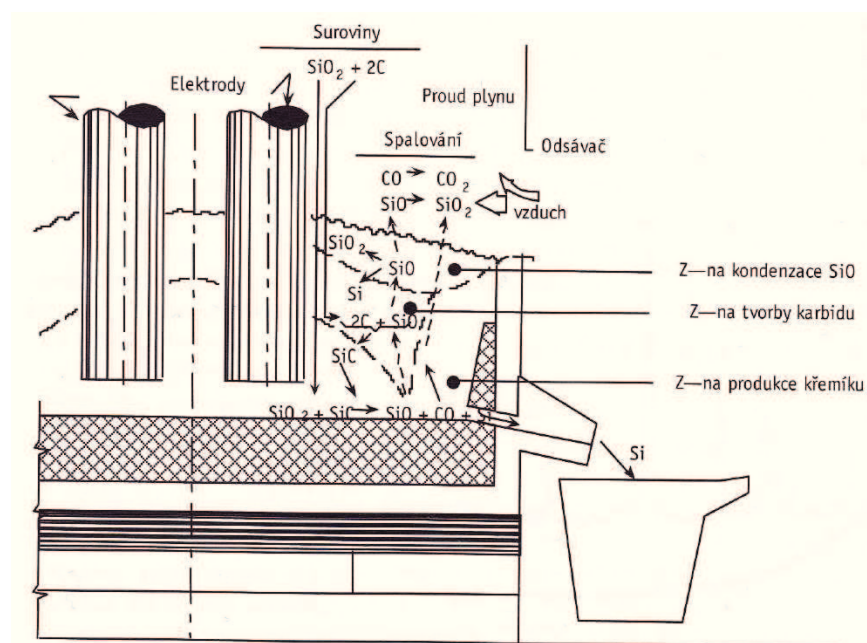
Obr. 9 Produkce odpadů z energetického zpracování uhlí v EU v roce 2000 [21]



Obr. 10 Využití popílků ve stavebnictví. Podle [21]

Popílek představuje velkou ekologickou zátěž. Průzkum ukázal, že v roce 2000 bylo v EU vyprodukováno asi 59 milionů tun odpadů z energetického zpracování uhlí, z toho 66 % tvořil právě popílek (viz Obr. 9). Necelá polovina celkového množství popílku je využívána ve stavebnictví, z toho 33 % je využíváno právě jako příměs do betonu. Další způsoby využití ve stavebnictví jsou uvedeny v grafu na Obr. 10. [21]

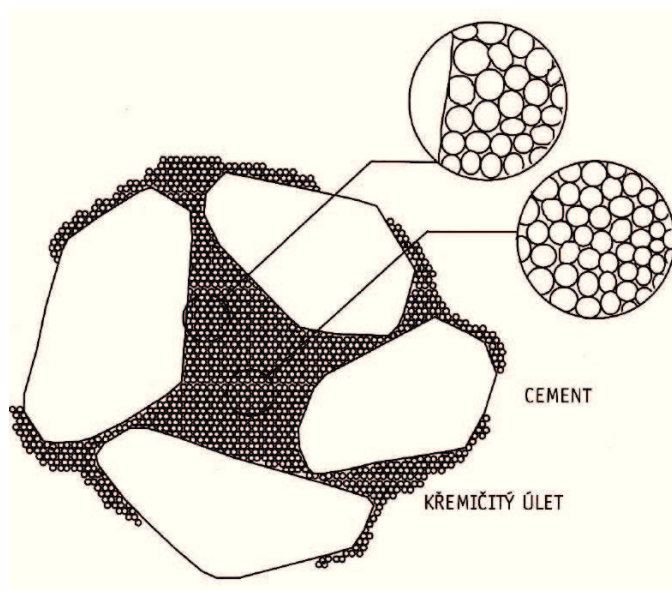
Křemičité úlety (mikrosilika) jsou vedlejším produktem výroby křemíku, ferosilicia a jiných slitin křemíku. Tyto látky se vyrábí v obloukové peci. Schéma tohoto procesu je znázorněno na Obr. 11. Křemičité úlety obsahují 85 až 98 % SiO_2 a vykazují pucolánové vlastnosti. [2, 30]



Obr. 11 Chemické reakce v peci při výrobě křemíku [2]

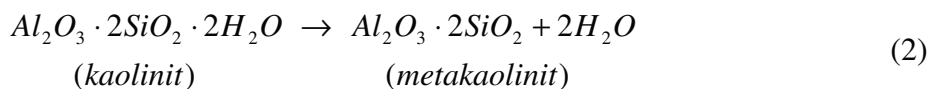
Křemičité úlety se vyznačují vysokým měrným povrchem 15000 až 25000 $\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$. Velikost jejich zrn se pohybuje v rozmezí 0,1 až 2 μm , což je výrazně méně než v případě cementu (viz Obr. 12). Zrna jsou dokonale kulovitá. Množství křemičitých úletů přidávaných do betonu je omezeno na maximálně 10 % z množství cementu. S větším množstvím roste i spotřeba vody. [2, 8, 30]

Křemičité úlety mají schopnost výrazně zvyšovat pevnost betonu. Používají se především pro vysokohodnotné betony s pevností nad 75 MPa. Pozitivně upravují také schopnost betonu odolávat průsaku a alkalicko-křemičité reakci, zabraňují odmísění a snižují rychlost karbonatace. [8, 29]



Obr. 12 Zaplnění prostorů mezi zrny cementu křemičitým úletem (H. Bache) [2]

Metakaolín je amorfni, vysoce reaktivni hlinitokřemičitanový pucolán. Vzniká výpalem (dehydratací) kaolínových jílu při teplotách 650 až 900 °C např. ve válcových rotačních pecích. Výpal probíhá dle reakce (2). Kaolíny jsou jemnozrnné sedimentární horniny, jenž vznikají zejména zvětráváním hornin s obsahem živce. [25, 26, 28]



Metakaolíny mají pórovitou strukturu. Významný vliv na vlastnosti metakaolínů mají podmínky tepelné úpravy, struktura a velikost krystalů. V Tab. 10 a 11 jsou uvedena chemická složení některých komerčně vyráběných metakaolínů. [26, 28]

Tab. 10 Chemické vlastnosti a míra rozlití metakaolínů vyráběných z jemnozrnných plavených kaolínů (typické hodnoty) [28]

Vlastnost metakaolínu	Značka metakaolínu				
	Mefisto K05	N META 4	S META 4	I META 4	KM 40
SiO ₂ [hm. %]	59,00	53,52	53,08	52,94	52,35
Al ₂ O ₃ [hm. %]	37,50	43,42	42,47	41,04	40,10
Fe ₂ O ₃ [hm. %]	0,70	0,91	1,03	1,64	1,45
TiO ₂ [hm. %]	0,53	0,59	0,33	0,36	0,74
CaO [hm. %]	0,11	0,32	0,33	0,26	0,38
MgO [hm. %]	0,26	0,25	0,24	0,30	0,40
K ₂ O [hm. %]	0,72	0,45	0,95	1,63	1,43
Na ₂ O [hm. %]	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01
ztráta žháním [hm. %]	1,21	0,43	1,43	1,81	3,12
míra rozlití [mm]	130	200	130	160	150

Tab. 11 Chemické vlastnosti a míra rozlití metakaolínů vyráběných ze středně hrubozrnných až hrubozrnných kaolínů, popř. jílu (typické hodnoty) [28]

Vlastnost metakaolínu	Značka metakaolínu				
	M META	M3 META	MPO META	P META	U META 6
SiO ₂ [hm. %]	54,00	53,00	52,00	79,00	53,34
Al ₂ O ₃ [hm. %]	39,07	41,10	40,00	15,08	35,20
Fe ₂ O ₃ [hm. %]	2,50	1,80	3,50	1,32	1,85
TiO ₂ [hm. %]	1,00	1,40	1,20	0,20	0,50
CaO [hm. %]	0,20	0,20	0,20	0,20	0,40
MgO [hm. %]	0,30	0,20	0,20	0,52	0,70
K ₂ O [hm. %]	1,70	0,90	1,50	3,21	3,00
Na ₂ O [hm. %]	0,02	0,02	0,03	0,02	0,50
ztráta žíháním [hm. %]	1,20	2,00	1,36	0,40	4,50
míra rozlití [mm]	320	250	160	400	155

Metakaolíny mají pozitivní vliv na vlastnosti betonu. Zvyšují pevnost v tahu i tlaku, snižují propustnost pro kapalné i plynné látky, snižují náchylnost k alkalicko-křemičité reakci a zvyšují odolnost v agresivním prostředí. Metakaolíny jsou mimo jiné využívány ke stavbě silnic, mostů, vodních děl a štíhlých konstrukcí, jako přísada do žárovzdorných materiálů a plnivo do pryže a plastů. [26]

3. Strusky

Strusky jsou odpadním produktem z průmyslové výroby kovů. V závislosti na způsobu výroby se liší chemické složení a vlastnosti strusek. Dle způsobu výroby se strusky dělí na:

- ocelářské strusky
- slévárenské strusky
- strusky z energetického průmyslu
- vysokopeční strusky

Kromě těchto čtyř druhů strusek z průmyslové výroby existuje struska i v přírodě. Tato struska je vulkanického původu. Obsahuje velké množství železa. Ve stavebnictví se nevyužívá.

Ocelářské strusky vznikající při zkujňování surového železa se vyznačují vysokým obsahem oxidů kovů, a proto mají tmavou barvu. V technologii betonu jsou využívány velmi výjimečně. Jedná se převážně o strusky zásadité povahy.

Bylo prováděno testování strusek z ocelářských pecí pro betony určené do komunikací a ve výrobě prefabrikovaných dílců. Strusky z pneumatických pochodů a z elektrických obloukových pecí svým složením brání využití v betonech.

Obecně tyto strusky mají užití zejména mimo stavební odvětví. Například při výrobě oceli v Thomasově konvektoru vzniká struska s vysokým obsahem kyseliny fosforečné. Tato struska je dále zpracovávána ve struskových mlýnech, čímž vzniká tzv. Thomasova moučka. Při správném složení je tato jemně mletá struska cenným umělým hnojivem. [24]

Slévárenské strusky jsou vedlejším produktem při výrobě litin v kupolních a indukčních pecích. Svým chemickým složením jsou naprosto nevhodné pro použití v technologii betonu. Obsahují nežádoucí karbidy.

Strusky z energetického průmyslu (škváry) jsou odpadním produktem při spalování tuhých paliv, především uhlí v teplárnách a elektrárnách. V technologii betonu jsou využívány například při přípravě škvárobetonu pro stavbu komunikací a výrobu stavebních dílců. Je však nutné důsledně otestovat jejich chemické složení.

3.1. Výroba vysokopecní strusky

Tato kapitola velmi stručně popisuje způsob získávání granulované vysokopecní strusky (GVS). Granulovaná vysokopecní struska je vedlejším produktem vysokopecního pochodu. Vysokopecní výroba železa má na území České (dříve Československé) republiky dlouholetou tradici. Z velkého počtu vysokých pecí, které se na našem území nacházely, zůstaly v provozu pouze vysoké pece v Třineckých železárnách a v Nové huti (dnes závod Vysoké pece společnosti ArcelorMittal Ostrava, a.s.).

Vysokopecní pochod je velmi složitý soubor procesů, jenž je prováděn za účelem získání železa z rud. Výroba železa je pojmem ještě komplexnějším. Zahrnuje vše od těžby kovonosné rudy až po zpracování výsledného produktu a vzniklých odpadů. Jelikož není možné ani nutné popsat všechny tyto procesy, tato kapitola se omezí pouze na popis surovin vstupujících do procesu, dále popis vysoké pece a dějů uvnitř probíhajících a na závěr popis zpracování výstupních produktů, zejména strusky.

Směs surovin, které vstupují do vysokopecního pochodu, je označována jako vsázka. Ta je tvořena těmito druhy surovin: [6]

- kovonosný materiál
- palivo
- struskotvorné přísady

V přírodě se železo nachází převážně ve formě sloučenin, nejčastěji v podobě oxidů železa a jejich hydrátů, v menší míře jako uhličitany či křemičitany. Tyto sloučeniny jsou obsaženy v rudách. Pro potřeby hutnictví jsou využívány pouze rudy bohaté na tyto sloučeniny s co nejmenším obsahem dalších příměsí. Mezi nejdůležitější železné rudy patří: [3, 6]

- hematit Fe_2O_3
- magnetit Fe_3O_4
- limonity $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$
- siderit $FeCO_3$
- chamosit $[Fe,Mg]_{15}Al_{10}Si_{11}O_{52} \cdot 16H_2O$

Jako doplňky rud jsou využívány také některé odpady z průmyslové výroby kovů. Množství těchto doplňků do vsázky je omezeno dle druhu odpadu. Takto jsou využívány např.: [3]

- některé typy strusek
- okuje (odpad při zpracování oceli)
- vysokopecní výhoz (odprašky při výrobě železa)
- kyzové výpražky (odpad výroby kyseliny sírové)
- šrot
- hrudky

Vytěžená ruda prochází fází hrubého třídění, kdy jsou od zbytku odděleny kusy rudy, které přesahují povolenou velikost. Pouze tyto nadměrné kusy se následně drtí nebo melou. Nadrcená ruda putuje na homogenizační skládku, která zajišťuje vyrovnaní jejího chemického složení, jelikož obsah železa v rudě je značně proměnlivý. Následuje mnoho dalších úprav rudy před samotným vstupem do vysokopecního pochodu, mezi něž patří obohacování, pražení, spékání (aglomerování) nebo sbalování (peletizace). Úpravou rud se obecně zabývají přidružené závody. [3, 6]

Palivo ve vysoké peci plní tři základní úlohy. Dodává teplo, působí jako redukční činidlo a umožňuje snadný prostup redukčních plynů celou náplní pece. Tyto tři úlohy beze zbytku plní pouze paliva pevná. Paliva kapalná a plynná mají pouze funkci částečné náhrady pevných. Nejrozšířenějším pevným palivem užívaným pro výrobu železa je kamenouhelný koks. Vyrábí se karbonizací rozemletého černého uhlí při teplotách 900 až 1150 °C v koksárenských pecích. Z výrobního procesu jsou získávány také další využitelné vedlejší produkty, jako např. koksárenský plyn, dehet, čpavek, benzen, fenol, atd. Kromě kamenouhelného koksu byla v minulosti využívána také další pevná paliva, jako dřevěné uhlí používané pro výrobu jakostního surového železa, hnědouhelný koks na území Německa nebo v případě USA antracit. Z paliv kapalných a plyných jsou nejčastěji využívány zemní nebo koksárenský plyn a nejrůznější topné oleje. [3, 6]

Kovonosné rudy obsahují kromě sloučenin železa také další sloučeniny, které jsou označovány jako hlušina. Hlušinu tvoří zejména CaO , MgO , SiO_2 a Al_2O_3 . Nevýhodou těchto sloučenin je vysoká teplota tavení, která je u všech sloučenin kromě SiO_2 vyšší než teplota ve vysoké peci. Ve vysokopecním pochodu za přesně vymezených podmínek tyto oxidy

a jejich sloučeniny přecházejí do strusky. Je vyžadován přesný poměr těchto oxidů, který by zajistil dokonalou redukci železa, chemicky by vázal síru a vznikala by struska ideálních vlastností, jak pro vysokopecní pochod (tekutost), tak pro další zpracování (chemické vlastnosti). Pro vyrovnaní těchto poměrů se do vsázky přidávají struskotvorné přísady. Výběr struskotvorné přísady závisí na povaze redukované látky. Hlavním faktorem je acidita či bazicita. [3]

Kyselé přísady jsou využívány prakticky pouze při výrobě ferosilicia, kde je nutný vysoký stupeň redukce křemíku, nebo při získávání kovu ze zásaditých rud. Příkladem takových struskotvorných přísad jsou křemenec, bauxit nebo hlinité břidlice. [3, 6]

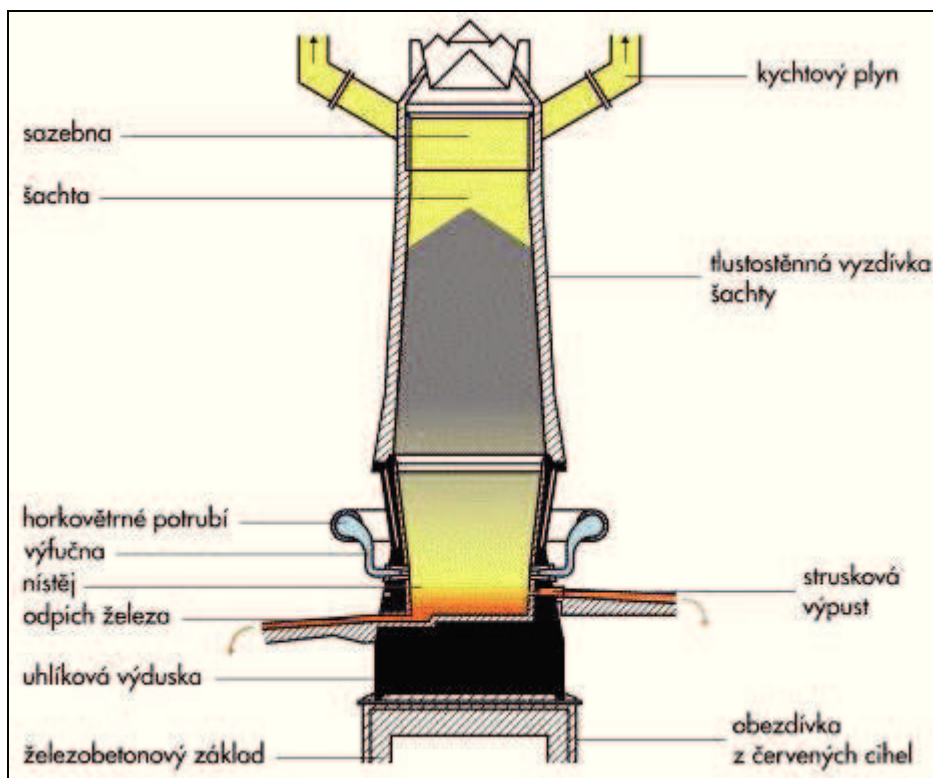
V ostatních případech jsou výhradně užívány zásadité přísady, protože většina rud je povahy kyselé. Nejdůležitější zásaditou přísadou je vápenec CaCO_3 . V přírodě se nikdy nenachází ve zcela čisté formě. Je však nutné, aby neobsahoval síru, která by mohla negativně ovlivnit vysokopecní pochod. Vápenec by také neměl obsahovat více než 1 % SiO_2 a Al_2O_3 , jejichž nadměrný obsah je nutné opět vyrovnávat přidáním CaO , což zvyšuje množství vzniklé strusky. Množství MgO ve vápenci do 12 % ovlivňuje strusku příznivě. Vzniklá struska je tekutější a také lépe váže síru obsaženou v rudě. Ve některých případech, například při výrobě feromanganu, je využíván také dolomitický vápenec nebo dolomit $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Zcela výjimečně jsou užívány ankerit nebo vápno.[3]

V Tab. 12 je uvedeno chemické složení vápence z lomu Kotouč Štramberk. Jedná se o velmi čistý vápenec, který obsahuje jen málo znečišťujících látek. Druhým uvedeným zástupcem zásaditých struskotvorných přísad je dolomitický vápenec.

Tab. 12 Chemické složení zásaditých struskotvorných přísad [3]

Druh přísady	Chemické složení v suchém stavu [%]							
	CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3	Fe	Mn	P	S
Štramberský vápenec	55,1	0,62	0,68	0,17	0,17	0,05	0,04	0,05
Dolomitický vápenec	30,0	20,5	1,50	1,00	-	-	0,07	0,35

Vysoká pec je typem pece šachtové. Tento typ pecí se využívá k výrobě železa již celá staletí, avšak k jejich automatizaci došlo teprve před několika desetiletími. Na Obr. 13 je znázorněna vysoká pec s popisem jejích hlavních částí. Tato pec pracuje na principu postupného klesání vsázky vlastní tíhou a současného prostupu redukčních plynů od nístěje k sazebně.



Obr. 13 Schéma vysoké pece

Vysokopecní pochod je nepřetržitý proces, trvající zpravidla několik let. Jelikož teploty pochodu dosahují až 2000 °C, musí být vysoká pec neustále ochlazována vodním chladicím systémem zabudovaným v plášti, aby nedocházelo k poškození šamotové vyzdívky pece. Žárovzdornost šamotu se pohybuje v teplotách 1660 – 1750 °C. Tento materiál má také poměrně vysokou pevnost v tlaku 10 – 32 MPa. Je tvořen SiO_2 a Al_2O_3 , jejichž společný obsah přesahuje 90 %. Do určité míry platí, že čím více obsahuje šamot Al_2O_3 , tím vzrůstá jeho žárovzdornost, jelikož ve vyzdívce zároveň roste obsah minerálu mullitu $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$, který dobře odolává vysokým teplotám. [1, 4, 30]

Do sazební jsou téměř neustále dopravovány vsázkové suroviny tak, aby hladina neklesla pod vymezenou hranici. Do spodní části šachty je přiváděn horký vítr, který stoupá proti vsázce. Teplota v sazebně se pohybuje v rozmezí 200 – 400 °C. Postačuje právě k vysušení a předehřátí vsázky. Sušení lze chemicky vyjádřit jako endotermickou reakci, při které dochází ke změně skupenství volné vody z kapalného na plynné. S prvotním zahřáním se především z koksu začínají uvolňovat prchavé látky (metan, vodík). Tento proces je ukončen teprve při teplotě 800 °C. [4]

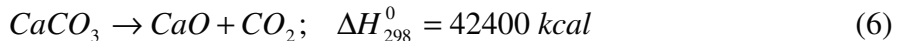
Se stoupající teplotou začínají v peci probíhat složitější chemické reakce. Dochází k rozkladu hydrátů, například goethitu, limonitu nebo kaolinitu, ze kterých se uvolňuje vodní

pára. Rozklady těchto hydrátů probíhají za rozdílných teplot a tak i pára, která se z nich uvolňuje vstupuje do rozdílných reakcí: [4]



Při reakcích (3) – (5) vzniká vodík, který napomáhá redukci sloučenin železa. Reakce s vodíkem však probíhá za vyšších teplot, než jakých je dosaženo u reakce (3). Vodík, stejně jako teplo této exotermické reakce, jež probíhá ve vyšších polohách pece, zůstává nevyužitý. U reakce (4) je nevýhodou vznik nežádoucího CO_2 . Nejvýhodnější je reakce (5), jelikož oba produkty mohou být dále využity k redukci, avšak tato je silně endotermní. [4]

Ve vysoké peci dále probíhají rozklady uhličitánů, jež se tam nacházejí např. v podobě vápence, magnezitu, dolomitu nebo ocelku. Uhličitany se vždy rozkládají na CO_2 a příslušný oxid. Příkladem takové reakce je rozklad vápence (6). [4]



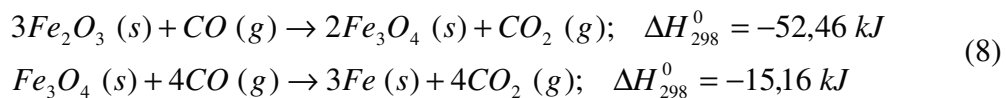
„Bylo zjištěno, že asi 2/3 až 3/4 veškerého CO_2 uvolněného rozkladem vápence ve vysoké peci reaguje s uhlíkem podle reakce (7) a značně tak vzrůstá spotřeba paliva.“ [4, str. 185]

Z těchto zjištění vyplývá, že je výhodnější využívat do vsázky zásaditý aglomerát namísto vápence. Tím se sníží spotřeba koksu. [4]

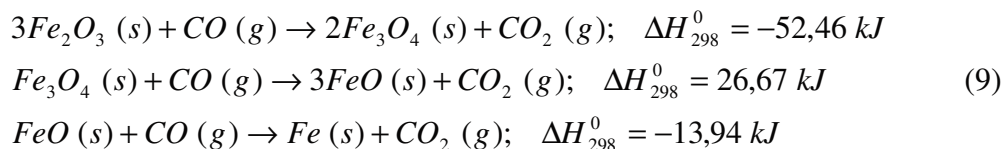
Samotná redukce oxidů železa tedy probíhá za pomoci redukčních činidel, kterými jsou H_2 , CO a C . Redukce se dělí na přímou a nepřímou. Přímou redukcí je označována redukce uhlíkem. Nepřímá redukce probíhá za přítomnosti oxidu uhelnatého. Redukce vodíkem je mnohdy také označována za nepřímou. Principem je postupné snižování počtu kyslíků v oxidech. Platí, že čím více je ve sloučenině kyslíků, tím je redukce jednodušší. Jejich postupným snižováním je redukce možná za stále složitějších podmínek. Průběh redukce je ovlivněn z velké části také teplotou. S teplotou se může měnit počet reakcí,

kteře jsou k úplné redukci zapotřebí. Pro názornost je zde uveden příklad redukce oxidů železa oxidem uhelnatým v závislosti na teplotě: [4, 6]

- teplota < 570 °C



- teplota > 570 °C



Při redukci (8) (resp. (9)) tedy dochází ke vzniku oxidu uhličitého. Obdobně probíhá i redukce vodíkem za vzniku vodní páry nebo redukce uhlíkem za vzniku oxidu uhelnatého. Zároveň s redukcí sloučenin železa dochází také k redukci doprovodných prvků, jakými jsou například mangan, křemík, fosfor, síra, uhlík nebo některé kovy. Po roztavení železa některé z nich přecházejí do taveniny. Dochází také k nauhličování železa, při nižších teplotách kolem 600 °C uhlíkem z CO, při vyšších teplotách kolem 1000 °C uhlíkem z koksu. [4, 6]

Oproti tomu oxidy vápníku, hořčíku a hliníku, které do vsázky vstupují ve formě hlušiny a struskotvorných přísad, jsou schopny redukce pouze při teplotách vyšších, než jakých je ve vysokých pecích dosahováno. Doprovází je také oxid křemičitý, který při výrobě surového železa redukuje maximálně z pětadvaceti procent, a malé množství dalších sloučenin, především oxidů a sulfidů. Tyto sloučeniny, které nezredukovaly, tvoří posléze strusku. [6]

Primární struska se začíná v peci tvořit s teplotou, při níž začíná měknout kovonosná vsázka, tj. asi 1100 – 1200 °C. Tato struska obsahuje vysoké množství FeO. Její složení se v průběhu vysokopecního pochodu často mění. Se zvyšující se teplotou obsah FeO vlivem postupující redukce klesá, a naopak obsah SiO₂, Al₂O₃, CaO a MgO roste. Primární strusky je také mnohem méně, jelikož ta se tvoří za podmínky, že se její oxidy dostávají do těsné blízkosti, a to při teplotách, které umožňují sloučení příslušných oxidů. Z Tab. 13 je zřejmé, že tyto sloučeniny mají nižší teploty tavení než oxidy, z nichž vznikly. [4, 6]

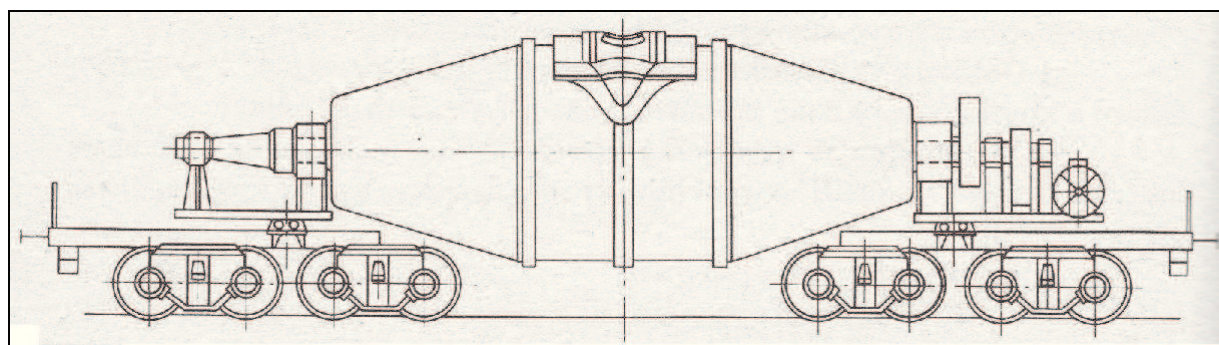
Postupným zvyšováním teploty v nižších částech pece silně zásadité CaO a MgO zaujímají místo slabě zásaditých FeO a MnO. V úrovni výfučen, kde teplota v peci dosahuje maxima, se opět složení strusky mění. Do strusky se přiměšuje popel koksu. Struska je v této

fázi nejtekutější. Spolu se surovým železem stéká do nístěje a zároveň ho odsiřuje. Zde se struska hromadí nad železem a probíhá poslední změna chemických vlastností produktu i odpadu. Dochází zde také k redukci největšího množství SiO_2 . Konečná struska by neměla neobsahovat téměř žádný FeO . Železo by mělo projít dokonalou redukcí. [4, 6]

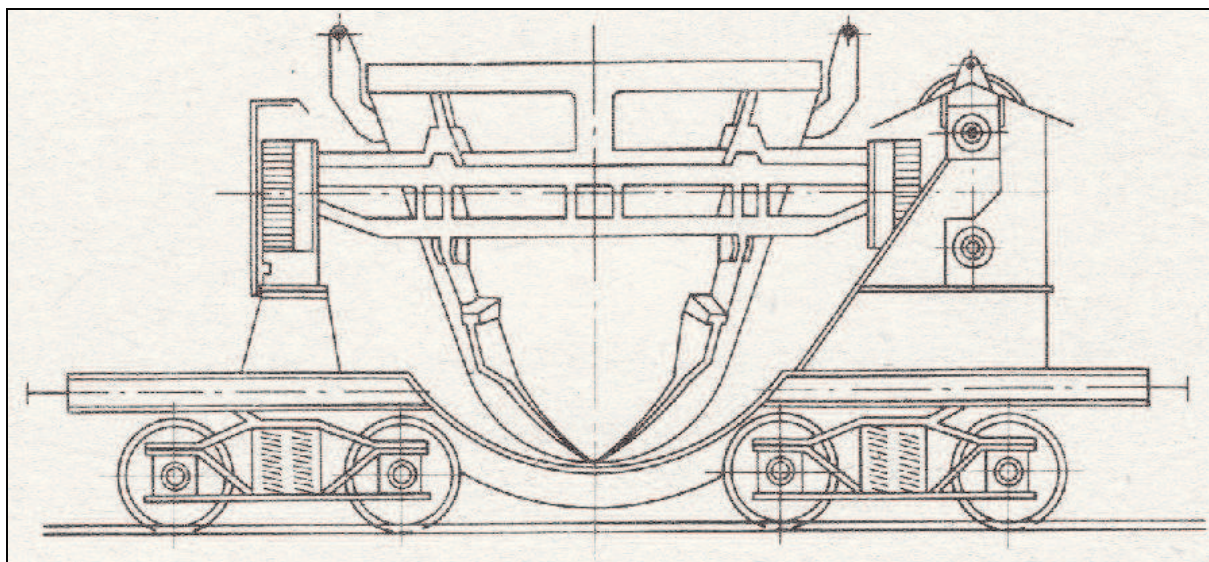
Tab. 13 Teploty tavení struskotvorných oxidů a jejich sloučenin [4]

Oxid	Sloučenina	Teplota tavení [°C]
CaO		2600
SiO_2		1713
MgO		2800
Al_2O_3		2030
FeO		1378
	CaSiO_3	1540
	MgSiO_3	1524
	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	1550
	Fe_2SiO_4	1220

Vypouštění železa a strusky se nazývá odpich. Ten je prováděn periodicky. Časový interval odpichů závisí na objemu vysoké pece a počtu výpustí. Výpust' strusky se nachází výš než výpust' železa. Struskovou výpustí z pece odchází tzv. „horní struska“. „Spodní struska“ odchází spolu se surovým železem a následně se od něj odděluje žlabovým sifonovým oddělovačem. Množství surového železa při jednom odpichu dosahuje až 800 t. Množství strusky je velmi proměnlivé v závislosti na bohatosti rudy. Pohybuje se v rozmezí hodnot $200 - 1000 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ surového železa. Surové železo i struska se od pece dopravují v pánvích. Na Obr. 14 je znázorněna pánev na surové železo, na Obr. 15 strusková pánev. Surové železo se následně vyváží buď přímo do oceláren nebo se z něj odlévají tzv. „housky“. Struska se převáží na určená místa, kde probíhá její ochlazování, tj. na struskové hospodářství nebo na odval. [5, 6]



Obr. 14 Pojízdný nosič na přepravu surového železa [6]



Obr. 15 Strusková pánev [6]

Použitý způsob ochlazení roztavené strusky je rozhodující pro získání jedné z jejích nejdůležitějších výsledných vlastností, tj. latentní hydraulity. Pokud dochází k pomalému přirozenému ochlazení struskové taveniny na vzduchu, pak mají částice strusky dostatek času pro vytvoření krystalické mřížky. Avšak struska jako krystalická látka nemá latentně hydraulické vlastnosti. V této formě bývá struska ve stavebním odvětví využívána např. jako kamenivo.

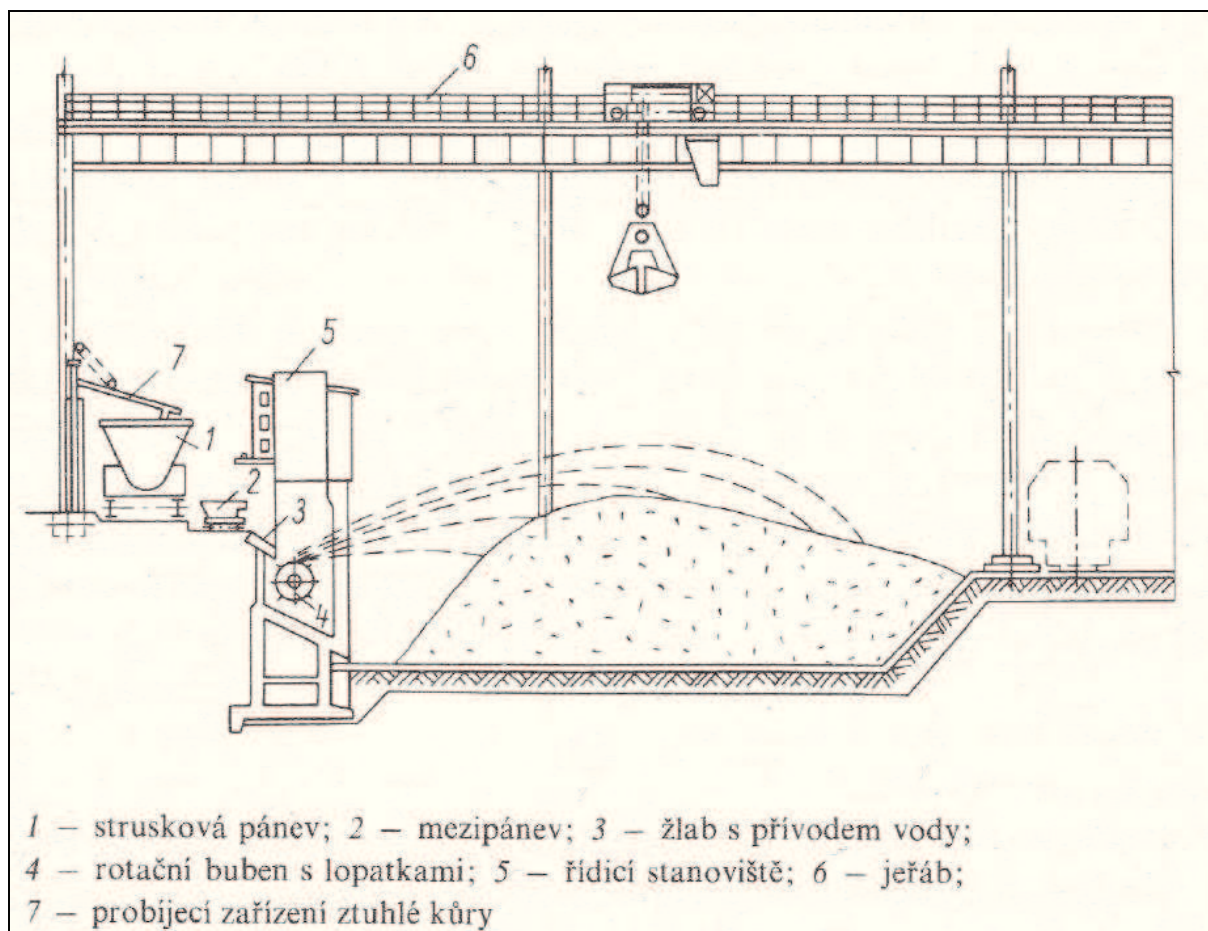
V současné době je častěji užíván způsob rychlého ochlazení roztavené strusky vodou (viz Obr. 17). Nedostatkem času pro vytvoření krystalické struktury vzniká látka amorfní. Tato struska již má potřebné latentně hydraulické vlastnosti. Rychlé ochlazení neboli granulování může být provedeno např. způsobem mokrým nebo polosuchým.

Mokrý způsob ochlazování strusky bývá přímo navázaný na výpusť strusky vysoké pece. Do vodního žlabu napojeného na výpusť je pod tlakem vháněna voda, která rozbíjí částice strusky a chladí je. Hmota je následně odváděna do nádrže, kde se hromadí. Zde je voda odfiltrována, zpětně ochlazována a přiváděna opět do žlabu. Takto ochlazená struska obsahuje velké procento vody. [7]

Jelikož je stanoven požadavek, aby strusky obsahovaly co nejméně vody, je výhodnější využívat polosuchý způsob ochlazení taveniny. Tím se zvýší kvalita strusky a odpadají náklady na sušení. Tato metoda kombinuje způsob ochlazení vodou a vzduchem. Na Obr. 16 je znázorněno zařízení sloužící ke granulaci polosuchým způsobem. Struska je k zařízení dopravena ve struskové pánvi. Z ní se postupně přelévá do mezipánve a dále do granulačního žlabu, do kterého je pod tlakem přiváděno nepatrné množství vody. Voda

strusku mírně ochladí, ale pouze do té míry, aby struska neztuhla. Ta ze žlabu následně dopadá na rotující buben s lopatkami, který ji rozbíjí na malé částčky a odráží je do vzduchu, kde se struska ochlazuje a částečně zbavuje vody. Vlhkost se pohybuje v rozmezí 5 – 10 %.

[5, 6]



Obr. 16 Polosuché granulační zařízení [6]

Další způsoby úpravy (např. mletí) ochlazené strusky závisí především na jejích chemických vlastnostech a vlastním budoucím použití. Zásaditost GVS je vyjadřována poměrem dle vzorce (10). Ten zohledňuje čtyři základní oxidy, jež tvoří 95 % obsahu strusky. V praxi nabývá tento poměr hodnot 0,9 – 1,2. [6]

$$B_2 = \frac{w_{(CaO)} + w_{(MgO)}}{w_{(SiO_2)} + w_{(Al_2O_3)}} \quad (10)$$



Obr. 17 Proces chlazení strusky (závod Vysoké pece společnosti ArcelorMittal Ostrava)

3.2. Vysokopecní strusky

Vysokopecní strusky mají zásaditou povahu. Převažujícími složkami těchto strusek jsou oxidy křemičitý a vápenatý, případně také hořečnatý. Jejich společné množství přesahuje 90 %.

Krystalické strusky, které vznikají pomalým ochlazením struskové taveniny, se ve stavebnictví využívají jako kamenivo do podkladních vrstev komunikací, zpevněných vrstev a do základových konstrukcí v agresivním prostředí.

Granulované strusky vznikají rychlým ochlazením struskové taveniny. Mají latentně hydraulické vlastnosti a jsou využívány jako pojiva. Jako katalyzátor hydratačního procesu postačuje i velmi malé množství oxidu vápenatého, který se uvolňuje při hydrataci cementu, proto je možné tyto strusky smísit s cementem v množství 6 až 95 % strusky z celkového množství pojiva. Se zvyšujícím se přídatkem strusky se snižuje hydratační teplo, jelikož hydratační proces strusky probíhá výrazně pomaleji. [8]

Charakteristika použité strusky mleté SMŠ 380

Struska mletá SMŠ 380 je velmi jemně mletá granulovaná vysokopecní struska. Výrobce je KOTOUČ ŠTRAMBERK, spol. s r.o. Struska SMŠ 380 vykazuje latentně hydraulické vlastnosti. Její aktivaci je možno provádět portlandským cementem, vápnem, sádkou, sádkovcem a roztoky alkalických sloučenin v závislosti na účelu použití. Neobsahuje další příměsi kromě intenzifikátorů mletí v maximálním množství 1 %.

Její užití je možné při výrobě maltových směsí, v silniční výstavbě a při výrobě betonů s požadavkem na zvýšenou konečnou pevnost a odolnost proti agresivnímu prostředí. Tato struska splňuje požadavky ČSN EN 197-1 [18].

V Tab. 14 jsou uvedeny výsledky analýzy SMŠ 380 a srovnání s podnikovou normou výrobce. V *Příloze 4* je znázorněn záznam RTG difrakční analýzy této strusky. Jelikož se jedná o amorfní látku nelze tuto metodu pro zjištění fázového složení efektivně využít, neboť na záznamu se žádná ze složek neprojeví. Pro srovnání je v *Příloze 5* uveden záznam RTG difrakce jiného typu strusky, jejíž struktura je krystalická.

Tab. 14 Výsledky rozboru SMŠ 380

Ukazatel jakosti	Jednotka	Požadovaná hodnota dle PN SMŠ 72 2090	Stanovená hodnota
Měrný povrch	m^2kg^{-1}	≥ 380	425,2
Zbytek na síti 0,045 mm	%	≤ 6	0,9
SiO ₂	%	28 – 45	37,77
Fe ₂ O ₃	%	< 1,5	0,42
Al ₂ O ₃	%	4 – 12	6,69
CaO	%	26 – 45	40,96
MgO	%	4 – 15	10,49
SO ₃	%	$\leq 1,5$	0,71
MnO	%		0,56
Cl ⁻	%	$\leq 0,1$	0,041
Na ₂ O + K ₂ O	%		0,86
Bazicita	%		1,362

4. Zkoušení pevnosti cementu a strusky

Cílem této kapitoly je ověření vlastností použitých pojiv, tj. cementu WARTA CEM I 42,5R-NA a strusky mleté SMŠ 380. Posuzovanými vlastnostmi byly pevnosti v tahu ohybem a tlaku po 28 dnech v závislosti na množství přidané vody. Postup přípravy malty, zkušebních těles a zkoušení byl proveden dle ČSN EN 196-1 [17].

4.1. Příprava malt a zkušebních těles

V této podkapitole je podrobně popsána technologie přípravy malt a zkušebních těles. Postup se liší od normy složením malty, konkrétně množstvím pojiva. Pro porovnání vlivu vody na použitá pojiva byly zvoleny receptury dle Tab. 15. Oproti normovému množství pro výrobu tří zkušebních těles tedy bylo použito ± 50 g pojiva. Každá receptura byla připravena dvakrát s rozdílem použitého pojiva.

Dále byl použit normalizovaný písek v oddělených frakcích. Každá ze tří frakcí hmotnosti 450 g byla navážena s přesností ± 1 g tak, aby byla dodržena maximální odchylka hmotnosti na celkové množství písku ± 5 g.

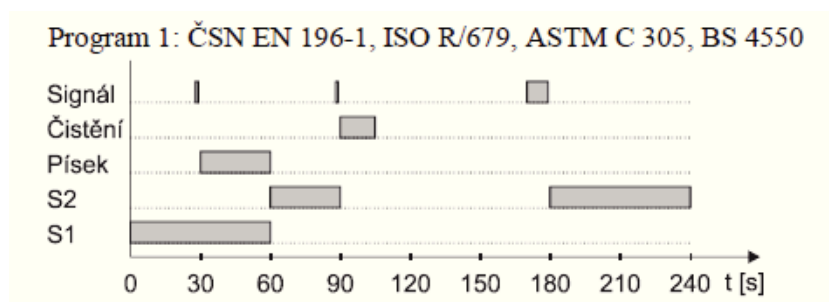
Tab.15 Receptury malt pro přípravu zkušebních těles

Složky	Receptura 1 (CEM 1, SMŠ 1)	Receptura 2 (CEM 2, SMŠ 2)
	Hmotnost	Hmotnost
-	g	g
Pojivo	500 \pm 2	400 \pm 2
Normalizovaný písek CEN	1350 \pm 5	1350 \pm 5
Voda	225 \pm 1	225 \pm 1

Pro přípravu malty bylo použita laboratorní míchačka BS MI-CM5A (Obr. 18) odpovídající požadavkům dle [17]. Do násypky byl vsypán normalizovaný písek počínaje nejhrubší frakcí. Do nádoby míchačky se vlila voda, poté byl přidán cement. Zařízení bylo spuštěno a proběhl automatický míchací program 1 s postupem dle Obr. 19, kde S1 je míchání při nízké rychlosti a S2 míchání při vysoké rychlosti.



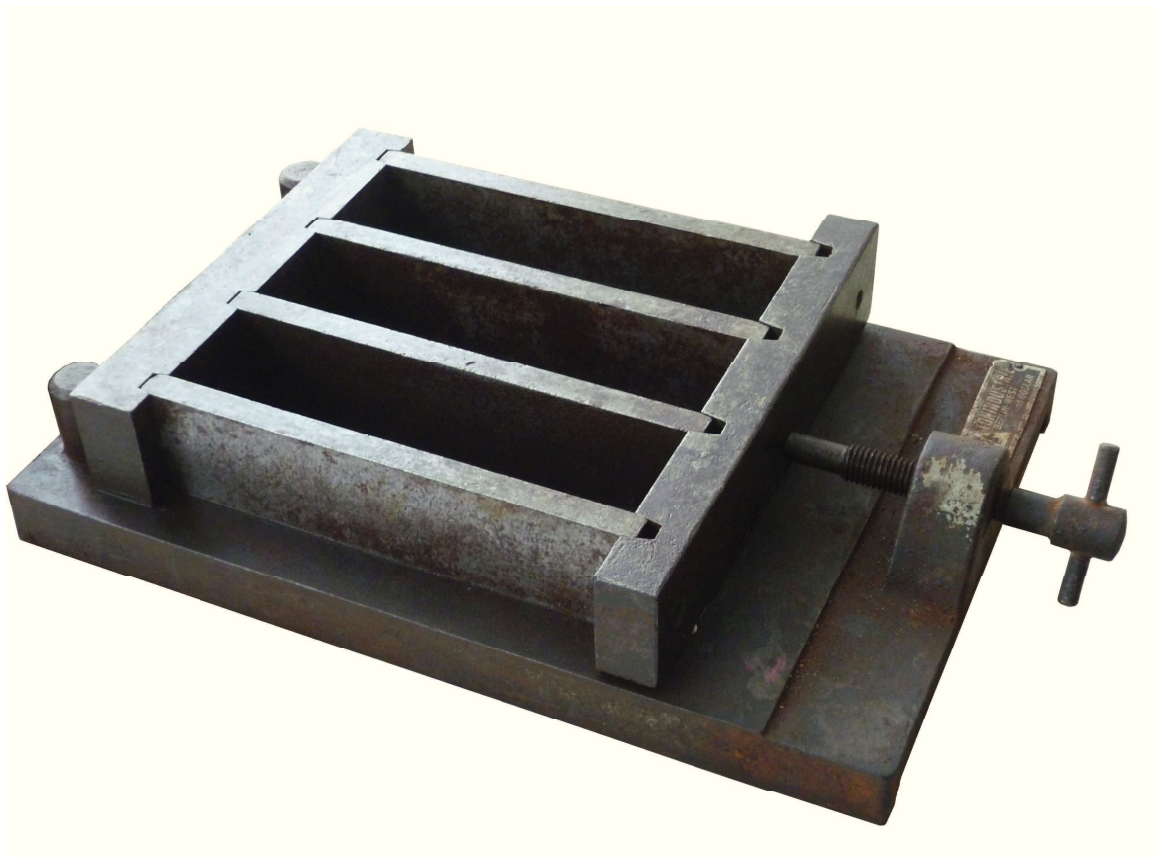
Obr. 18 Laboratorní míchačka BS MI-CM5A



Obr. 19 Časové schéma míchání

Po ukončení míchání byla připravena zkušební tělesa. Pro jejich vytvoření byla použita forma pro současnou přípravu tří zkušebních těles rozměrů 40 x 40 x 160 mm (viz Obr. 20) a skleněná deska tloušťky 6 mm o rozměrech 210 x 185 mm. Forma i deska byly natřeny odformovacím olejem. Forma byla naplněna cementovou maltou a uložena na vibrační stůl a během krátkého vibrování doplněna tak aby byla zaplněna až po okraj. Následně byly očištěny hrany formy, ta byla následně zakryta skleněnou deskou.

Forma byla uložena do skříně pro vlhké uložení trámečků BS VLH-203 (viz Obr. 21). Odformování probíhalo rozdílně pro cement a pro strusku. Cementové trámečky byly odformovány po 24 hodinách. Struskové trámečky po 96 hodinách. Všechny trámečky následně byly označeny a vodorovně uloženy do vodní lázně.



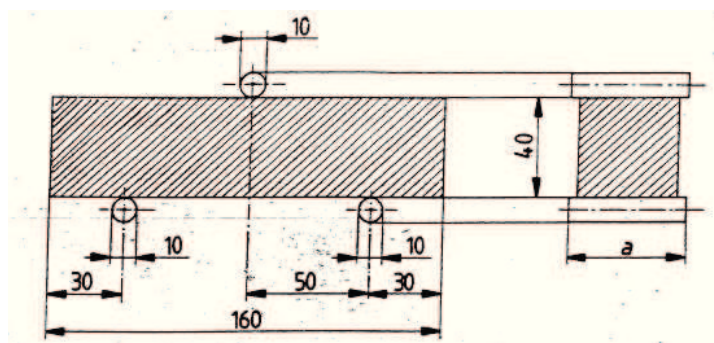
Obr. 20 Forma pro přípravu zkušebních těles – trámečků



Obr. 21 Skříň pro vlhké uložení trámečků BS VLH-203

4.2. Stanovení pevnosti zkušebních těles

Pro všechna zkušební tělesa byly provedeny zkoušky pevnosti v tahu ohybem a pevnosti v tlaku ve zkušebním zařízení DESTTEST 4310 COMPACT.



Obr. 22 Schéma umístění zkušebního tělesa ve zkušebním lisu [17]

Zkušební tělesa ve stáří 28 dní byla vyjmuta z vodní lázně 15 minut před započítáním zkoušky. Následně byly ze zkoušených ploch očištěny veškeré usazeniny. Tělesa byla postupně vkládána do lisu pro stanovení pevnosti tahu ohybem dle Obr. 22, kde byla zatěžována rychlostí 50 ± 10 N/s až do úplného porušení, tj. zlomení (viz Obr. 23). Výsledné hodnoty sil potřebných k porušení zkušebních těles jsou zapsány v Tab. 16. Pevnosti v tahu ohybem byly dodatečně vypočteny podle vzorce (11) s přesností 0,1 MPa.



Obr. 23 Porušená zkušební tělesa

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot l}{b^3} \quad (11)$$

kde: R_f – pevnost v tahu za ohybu [MPa]

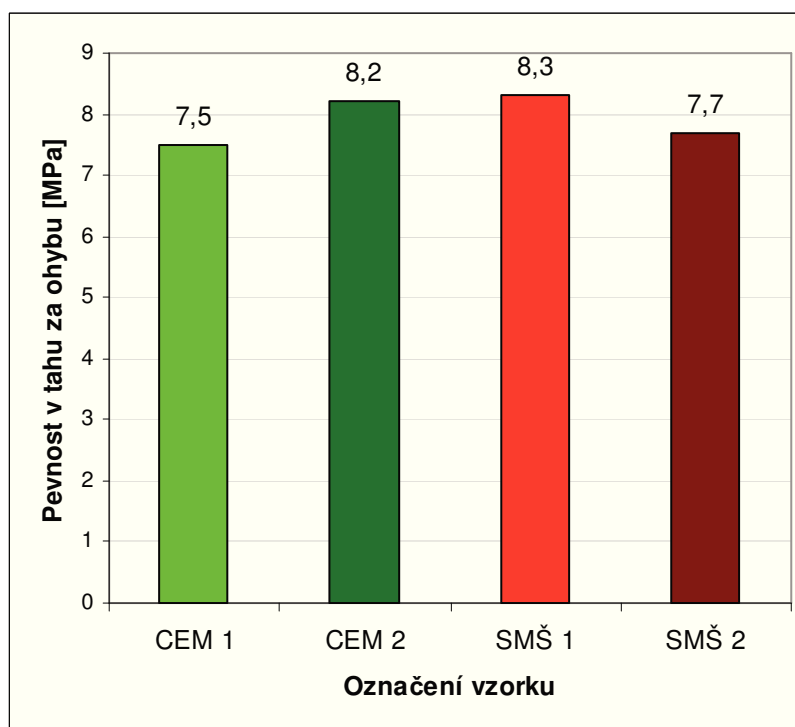
b – strana čtvercového průřezu trámečku [mm]

F_f – zatížení vynaložené na střed trámečku [N]

l – vzdálenost mezi podporami [mm]

Tab. 16 Pevnost v tahu ohybem - trámečky

Označení vzorku	Typ tělesa	Rozměry			Hmotnost	Datum		Síla	Pevnost	Průměr
		Šířka	Výška	Délka		výroby	zkoušení			
-	-	mm	mm	mm	kg	-	-	kN	MPa	MPa
CEM 1.1	TR	40	40	161	0,565	2.5.11	30.5.11	3,16	7,41	7,5
CEM 1.2	TR	40	40	161	0,573	2.5.11	30.5.11	3,31	7,76	
CEM 1.3	TR	40	40	161	0,579	2.5.11	30.5.11	3,15	7,38	
CEM 2.1	TR	40	40	160	0,569	19.3.12	16.4.12	3,70	8,67	8,2
CEM 2.2	TR	40	40	160	0,571	19.3.12	16.4.12	3,55	8,32	
CEM 2.3	TR	40	40	160	0,565	19.3.12	16.4.12	3,20	7,50	
SMŠ 1.1	TR	40	40	160	0,562	2.5.11	30.5.11	3,61	8,46	8,3
SMŠ 1.2	TR	40	40	160	0,573	2.5.11	30.5.11	3,33	7,80	
SMŠ 1.3	TR	40	40	160	0,585	2.5.11	30.5.11	3,62	8,48	
SMŠ 2.1	TR	40	40	161	0,564	19.3.12	16.4.12	3,62	8,48	7,7
SMŠ 2.2	TR	40	40	160	0,566	19.3.12	16.4.12	3,10	7,27	
SMŠ 2.3	TR	40	40	160	0,572	19.3.12	16.4.12	3,15	7,38	



Obr. 24 Průměrné hodnoty pevnosti v tahu ohybem - trámečky

Z každého původního zkušební tělesa vznikla zlomením dvě zkušební tělesa nová. Tato tělesa byla následně použita pro stanovení pevnosti v tlaku. Tělesa byla vložena do lisu mezi pomocné destičky rozměru 40 x 40 mm. Následně byla zatěžována rychlostí 2400±200 N/s až do úplného porušení. Hodnoty nejvyšších zatížení při porušení jsou zapsány v Tab. 17. Výsledné pevnosti v tlaku jsou vypočteny dle vztahu (12) s přesností na 0,1 MPa.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (12)$$

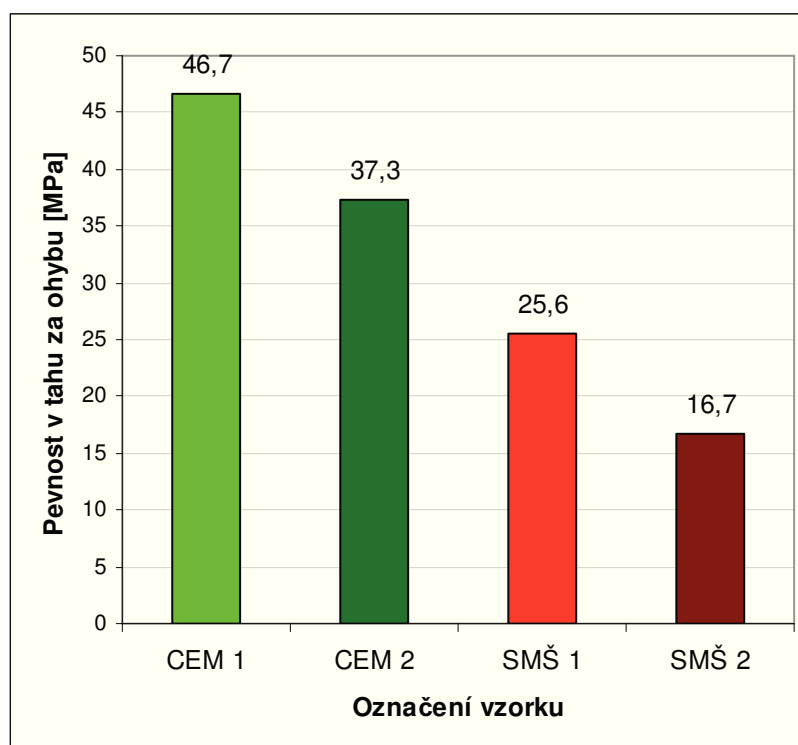
kde: R_c – pevnost v tlaku [MPa]

F_c – nejvyšší zatížení vynaložené při porušení [N]

1600 – plocha destiček nebo pomocných destiček rozměrů 40 x 40 mm [mm²]

Tab. 17 Pevnost v tlaku - trámečky

Označení vzorku	Typ tělesa	Rozměry		Datum		Síla	Pevnost	Průměr
		Šířka	Výška	výroby	zkoušení			
-	-	-	mm	mm	-	-	kN	MPa
CEM 1.1	1	TR	40	40	2.5.11	30.5.11	75,13	46,93
	2	TR	40	40	2.5.11	30.5.11	73,79	46,12
CEM 1.2	1	TR	40	40	2.5.11	30.5.11	77,82	48,64
	2	TR	40	40	2.5.11	30.5.11	74,57	46,61
CEM 1.3	1	TR	40	40	2.5.11	30.5.11	73,48	45,93
	2	TR	40	40	2.5.11	30.5.11	73,94	46,21
CEM 2.1	1	TR	40	40	19.3.12	16.4.12	56,91	35,57
	2	TR	40	40	19.3.12	16.4.12	58,66	36,66
CEM 2.2	1	TR	40	40	19.3.12	16.4.12	61,00	38,13
	2	TR	40	40	19.3.12	16.4.12	63,06	39,41
CEM 2.3	1	TR	40	40	19.3.12	16.4.12	59,49	37,18
	2	TR	40	40	19.3.12	16.4.12	59,27	37,04
SMŠ 1.1	1	TR	40	40	2.5.11	30.5.11	40,14	25,09
	2	TR	40	40	2.5.11	30.5.11	36,89	23,06
SMŠ 1.2	1	TR	40	40	2.5.11	30.5.11	40,84	25,53
	2	TR	40	40	2.5.11	30.5.11	42,04	26,28
SMŠ 1.3	1	TR	40	40	2.5.11	30.5.11	42,38	26,49
	2	TR	40	40	2.5.11	30.5.11	43,31	27,07
SMŠ 2.1	1	TR	40	40	19.3.12	16.4.12	27,39	17,12
	2	TR	40	40	19.3.12	16.4.12	26,69	16,68
SMŠ 2.2	1	TR	40	40	19.3.12	16.4.12	27,08	16,93
	2	TR	40	40	19.3.12	16.4.12	25,82	16,14
SMŠ 2.3	1	TR	40	40	19.3.12	16.4.12	26,56	16,60
	2	TR	40	40	19.3.12	16.4.12	26,36	16,48



Obr. 25 Průměrné hodnoty pevnosti v tlaku - trámečky

5. Zkoušení čerstvého betonu

Tato kapitola se zabývá návrhem receptury, popisem technologie přípravy čerstvého betonu (ČB) a následným zkoušením jeho okamžitých vlastností. Součástí těchto zkušebních metod bylo ověření předepsané konzistence čerstvého betonu sednutím kužele, dále ověření objemové hmotnosti čerstvého betonu a stanovení procentuálního obsahu vzduchu. Závěrem této kapitoly je uveden popis zpracování čerstvého betonu, tj. přípravy zkušebních těles pro následné zjištění mechanických a chemických vlastností ztvrdlého betonu.

5.1. Návrh receptury čerstvého betonu

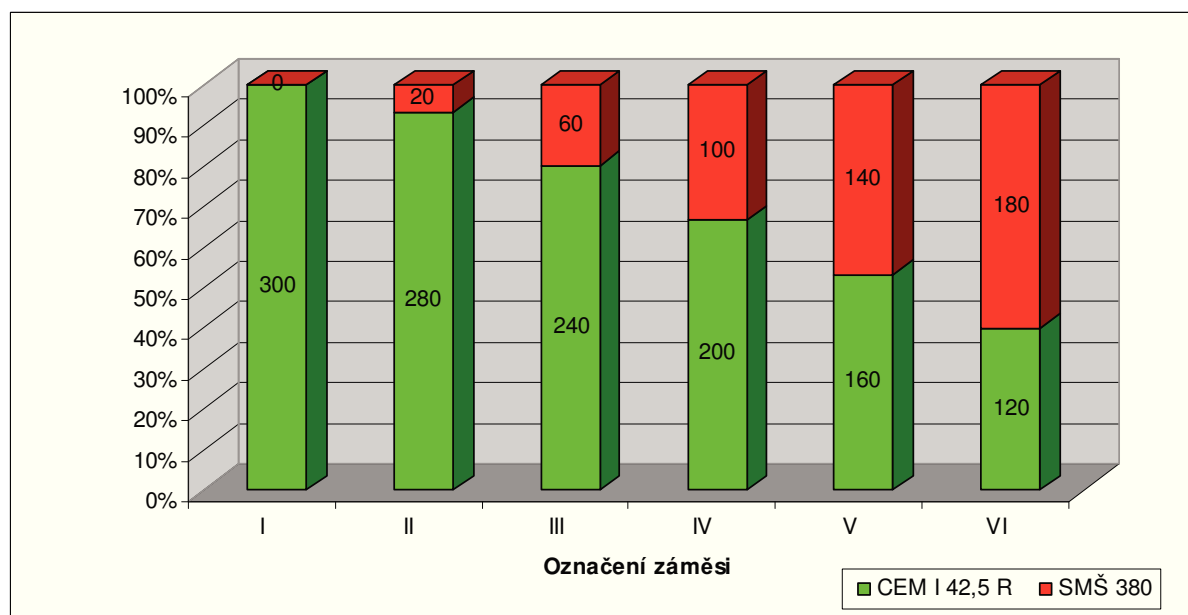
Pro účely této práce byly receptura stanovena dle normy ČSN EN 206-1 [19]. Základními požadavky pro návrh receptury byla návrhová objemová hmotnost $2350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a výsledná konzistence S4. Dále bylo stanoveno celkové množství pojiva, tj. cementu CEM I 42,5R a strusky SMŠ 380, na $300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Poměry použitých frakcí kameniv a výsledná křivka zrnitosti jsou popsány v kapitole 2.1. Norma [19] doporučuje používat pro beton s konzistencí $\geq \text{S4}$ plastifikační přísady. Konzistence čerstvého betonu S4 odpovídá sednutí kužele v hodnotě 160 až 210 mm. Vodní součinitel $w = 0,6$, což odpovídá množství vody $180 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Množství plastifikační přísady Stacheplast bylo stanoveno na 0,7 % hmotnosti z celkové dávky pojiva, tj. cementu a strusky. Vzhledem k zanedbatelnému množství není přísada započítávána do návrhové objemové hmotnosti.

Tab. 18 Podíly použitých pojiv

Označení záměsi	CEM I 42,5R		SMŠ 380	
	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	%	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	%
I	300	100,00	0	0,00
II	280	93,33	20	6,67
III	240	80,00	60	20,00
IV	200	66,67	100	33,33
V	160	53,33	140	46,67
VI	120	40,00	180	60,00

Pro porovnání vlivu vysokopecní granulované strusky na vlastnosti betonu byla zvolena referenční záměs I, jenž obsahuje pouze cement, a dále porovnávané záměsi II – VI,

jenž obsahují pojiva v poměrech zapsaných v Tab. 18. Poměr cement / struska je graficky znázorněn na Obr. 26.



Obr. 26 Poměr cement / struska

Dle těchto podmínek byly vytvořeny předpokládané receptury, zapsané v Tab. 19. Zároveň je v Tab. 20 uveden přepočet na odpovídající množství 40 l pro přípravu deseti zkušebních těles – krychlí rozměru 150 x 150 x 150.

Pro skutečně připravené receptury bylo nutné upravit množství vody, jenž bylo ovlivněno vlhkostí v kamenivu a odhadem v návrhu, tak, aby receptura splňovala podmínku konzistence S4. Z kapacitních důvodů nebylo možné kamenivo před použitím vysušit v celém objemu. Množství vody v kamenivu bylo stanoveno vysušením vzorku z každé frakce kameniva. Receptury skutečně připravených záměsů jsou zapsány v Tab. 21.

Tab. 19 Složení návrhové receptury [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

Vstupní složky	Označení záměsi / Množství složky					
	I	II	III	IV	V	VI
-	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$					
CEM I 42,5R	300	280	240	200	160	120
SMŠ 380	-	20	60	100	140	180
0/2 Bienkowitz	449	449	449	449	449	449
0/4 Tovačov	449	449	449	449	449	449
8/16 Hrabůvka	972	972	972	972	972	972
Stacheplast	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
Voda	180	180	180	180	180	180
Objemová hmotnost	2350					

Tab. 20 Složení návrhové receptury pro objem 40 l

Vstupní složky	Označení záměsi / Množství složky					
	I	II	III	IV	V	VI
-	kg					
CEM I 42,5R	12,00	11,20	9,60	8,00	6,40	4,80
SMŠ 380	-	0,80	2,40	4,00	5,60	7,20
0/2 Bienkowice	17,96	17,96	17,96	17,96	17,96	17,96
0/4 Tovačov	17,96	17,96	17,96	17,96	17,96	17,96
8/16 Hrabůvka	38,88	38,88	38,88	38,88	38,88	38,88
Stacheplast	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084
Voda	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20

Tab. 21 Skutečné složení receptury pro objem 40 l

Vstupní složky	Označení záměsi / Množství složky					
	I	II	III	IV	V	VI
-	kg					
CEM I 42,5R	12,00	11,20	9,60	8,00	6,40	4,80
SMŠ 380	-	0,80	2,40	4,00	5,60	7,20
0/2 Bienkowice	17,96	17,96	17,96	17,96	17,96	17,96
0/4 Tovačov	17,96	17,96	17,96	17,96	17,96	17,96
8/16 Hrabůvka	38,88	38,88	38,88	38,88	38,88	38,88
Stacheplast	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084
Voda	7,36	7,36	7,56	7,56	7,30	7,20

5.2. Příprava čerstvého betonu

V této podkapitole je podrobně popsán technologický postup přípravy čerstvého betonu. Postup je shodný pro všechny záměsi.

Beton byl připravován v laboratorní míchačce typu BS LBM-75. Předem byly připraveny suroviny. Všechny suroviny byly dávkovány hmotnostně. Nástroje, které se dostaly do přímého kontaktu s čerstvým betonem, byly předem navlhčeny, včetně laboratorní míchačky. Do ní se nejprve ukládalo kamenivo, v pořadí od nejhrubší frakce po nejjemnější, tj. 8/16, 0/4 a 0/2. Do kameniva byla odlita přibližně třetina celkového množství vody. Takto navlhčené kamenivo bylo krátce promícháno. Do středu kameniva se uložil cement (resp. cement a struska). Prohlubeň byla zakryta okolním kamenivem, aby nedocházelo k úbytku pojiva vlivem prášení. Opět byl spuštěn proces promíchávání, přičemž za stálého chodu bylo do míchačky opatrně vpraveno zbylé množství vody. Proces byl v průběhu míchání na cca 15–20 s pozastaven, aby byl opticky a mechanicky zkontrolován stav promísení složek (viz Obr. 27). Po opětovném spuštění míchání byl do záměsi pomalu vpravován plastifikátor Stacheplast. S přidáním plastifikátorem byl beton promícháván dalších 90 s.

Správnost přípravy čerstvého betonu byla ověřena provedením zkoušky sednutí kužele. Teprve pokud konzistence vyhovovala předepsané kategorii, pak byla záměs považována za vhodnou pro další použití a bylo možné pokračovat ve zkoušení. V opačném případě muselo být upraveno množství použité vody.



Obr. 27 Kontrola čerstvého betonu před přidáním plastifikátoru

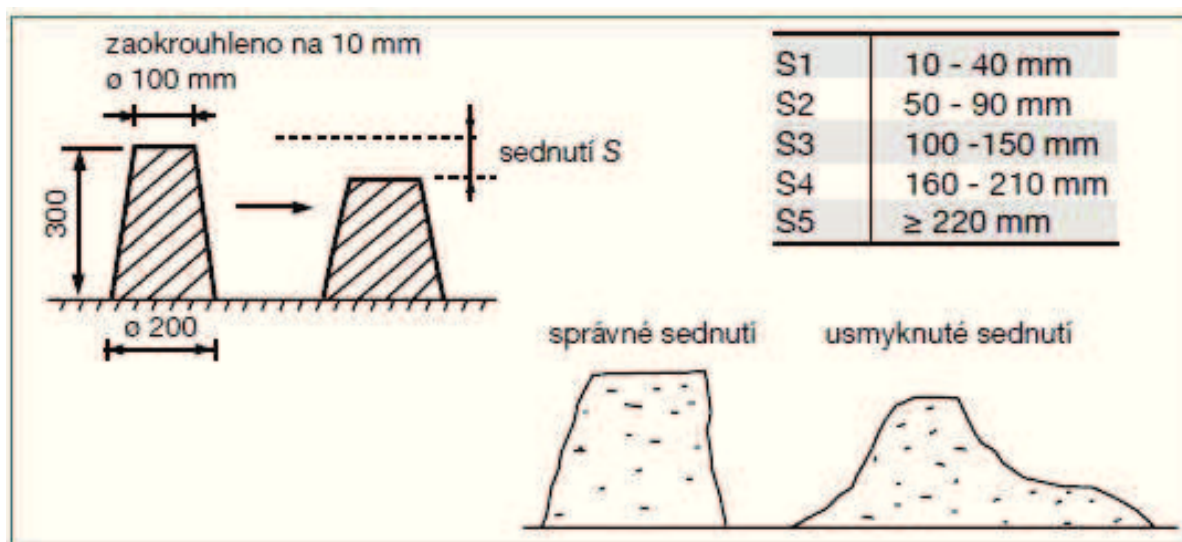
5.3. Stanovení konzistence čerstvého betonu

Předepsaná konzistence S4 byla ověřována odpovídající metodou sednutí kužele. Zkouška byla prováděna dle příslušné normy ČSN EN 12350-2 [10].

Před započítáním zkoušky bylo nutné navlhčit veškeré nástroje, které se v průběhu zkoušky dostaly do přímého kontaktu s čerstvým betonem, tj. podkladní deska, propichovací tyč a forma s násypkou. Rozměry formy tvaru komolého kuželu jsou: výška 300 ± 2 mm, průměr dolní základny 200 ± 2 mm a průměr horní základny 100 ± 2 mm (viz Obr. 28).

Do středu podkladní desky byla umístěna forma s násypkou pro snadné naplnění formy betonem. Forma byla plněna ve třech vrstvách. Každá vrstva byla zhutněna pětadvaceti vpichy kovovou tyčí. Poté byla odstraněna násypka a povrch čerstvého betonu byl zarovnan do roviny s formou. Z podkladní desky i formy byly odstraněny přebytečné nečistoty. Forma

byla zdvižena kolmo vzhůru. Zdvih formy proběhl v normovém časovém intervalu 2-5 s. Pomocí měřidla se zjistilo okamžité sednutí, tj. rozdíl výšky formy a nejvyššího bodu sednutého kužele čerstvého betonu (viz Obr. 28). Zároveň byla kontrolována možnost nežádoucí segregace betonu a nesprávného usmyknutí. Pokud by došlo k usmyknutí, bylo by nutné zkoušku zopakovat.

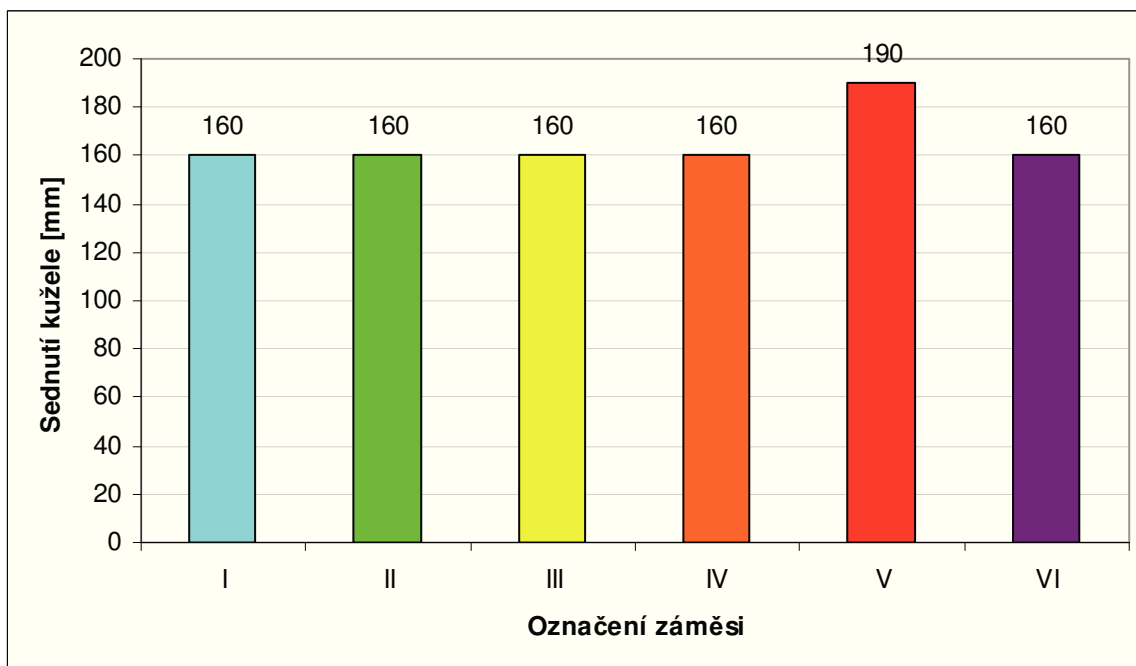


Obr. 28 Parametry zkoušky sednutí kužele [27]

Konzistence S4 se dle normy pohybuje v hodnotách sednutí 160–210 mm. Výsledné hodnoty a tvrzení jsou uvedené v Tab. 22. Hodnoty jsou dle normy [10] zaokrouhleny na nejbližších 10 mm. Zkouška, za předpokladu že vyhověla, byla prováděna vždy jednou pro každou záměs.

Tab. 22 Zkouška sednutí kužele

Označení záměsi	Sednutí kužele	Segregace ANO/NE	Sednutí správné/usmyknuté	Konzistence S4 ANO/NE
	mm			
I	160	NE	správné	ANO
II	160	NE	správné	ANO
III	160	NE	správné	ANO
IV	160	NE	správné	ANO
V	190	NE	správné	ANO
VI	160	NE	správné	ANO



Obr. 29 Graf hodnot sednutí kužele

5.4. Stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu

Stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu se řídí normou ČSN EN 12350-6 [11]. Principem zkoušky je stanovení objemové hmotnosti výpočtem z hmotnosti čerstvého betonu o známém objemu.



Obr. 30 Zkušební zařízení pro stanovení obsahu vzduchu v ČB – Form+Test Prüfsysteme

Norma požaduje stanovení objemové hmotnosti na vzorku o minimálním objemu $\underline{V} = 5 \text{ dm}^3$. Jako nádoba známého objemu byla využit hrnec tlakové nádoby pro stanovování obsahu vzduchu v čerstvém betonu (viz Obr. 30). Tato kalibrovaná nádoba má objem $\underline{V} = 8 \text{ dm}^3$.

Stejně jako u předchozích postupů i zde bylo nutné nejprve navlhčit všechny potřebné pomůcky. Prázdná nádoba byla uložena na váhu, která se následně pro zjednodušení vynulovala. Poté byla nádoba naplněna až po volný okraj. Na vibračním stole byl obsah za postupného doplňování zhutněn. Volný povrch čerstvého betonu byl zarovnan do roviny s okrajem. Naplněná a zhutněná nádoba byla opět postavena na váhu. Z váhy poté byla odečtena hmotnost čerstvého betonu \underline{m} . Naplněná nádoba byla dále využita pro stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu. Pro stanovení objemové hmotnosti výpočtem platí vztah (13).

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} = \frac{m}{V} \quad (13)$$

kde: D – objemová hmotnost [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

m_1 – hmotnost prázdné nádoby [kg]

m_2 – hmotnost naplněné nádoby se zhutněným betonem [kg]

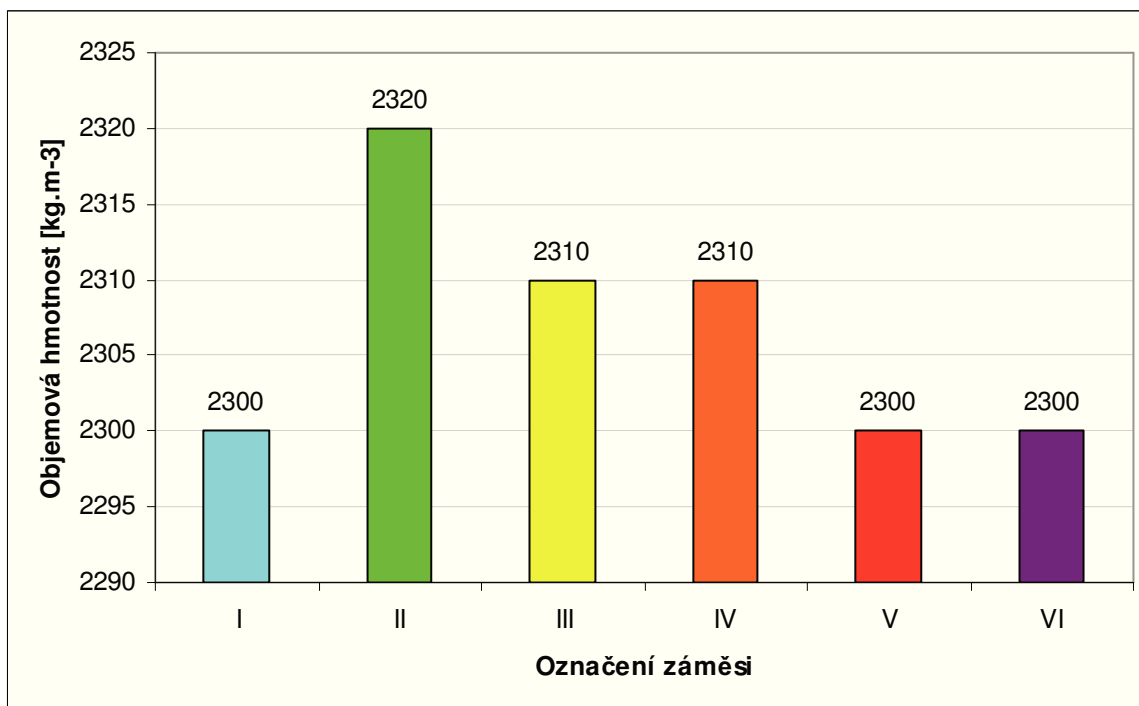
m – hmotnost zhutněného čerstvého betonu bez nádoby [kg]

V – objem nádoby [m^3]

Naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 23. Zjištěné objemové hmotnosti jsou dle normy zaokrouhleny na nejbližších $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Tab. 23 Hodnoty objemových hmotností ČB

Označení záměsi	Objem nádoby	Hmotnost ČB	Objemová hmotnost ČB
	m^3	kg	kg/m^3
I	0,008	18,36	2300
II		18,54	2320
III		18,50	2310
IV		18,46	2310
V		18,40	2300
VI		18,38	2300



Obr. 31 Graf hodnot objemových hmotností ČB

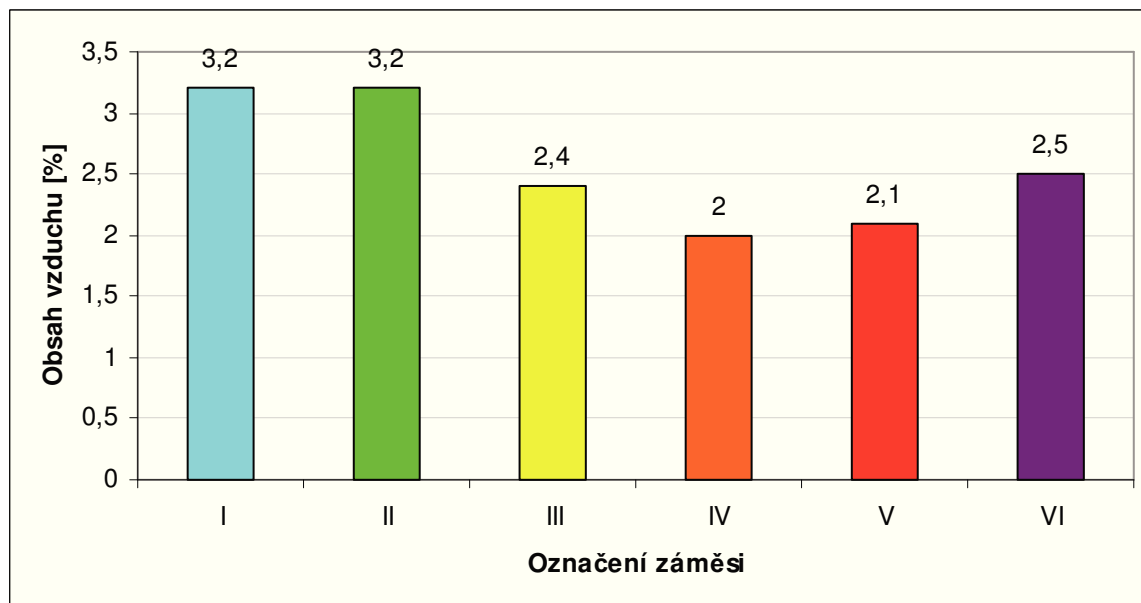
5.5. Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu

Stanovování obsahu vzduchu v čerstvém betonu se řídí normou ČSN EN 12350-7 [12]. Princip zkoušky je založen na míře stlačitelnosti betonu, ve kterém jsou schopny stlačení pouze vzduchové bubliny.

Z předchozí zkoušky byl již připraven hrnek tlakové nádoby naplněný čerstvým betonem. Bylo třeba očistit hranu nádoby tak, aby bylo možné ji uzavřít vzduchotěsným víkem s tlakovou nádrží. Po uzavření víka byly povoleny ventily na bocích. Jedním ventilem byla do vnitřního prostoru mezi povrchem betonu a víkem vháněna voda, druhým ventilem z tohoto prostoru unikál vzduch. Poté, co byl odstraněn veškerý vzduch a druhým ventilem unikala již pouze voda, byly oba ventily uzavřeny. Do tlakové nádrže se stlačil vzduch. Ručička měřicího zařízení byla nastavena do polohy červené rysky. Následně byl povolen uzávěr mezi tlakovou nádrží a hrncem. Na měřidle byl odečten okamžitý obsah vzduchu v čerstvém betonu. Hodnoty obsahu vzduchu A_c v jednotlivých záměsech jsou uvedeny v Tab. 24.

Tab. 24 Hodnoty obsahu vzduchu v ČB

Označení záměsi	Obsah vzduchu
	%
I	3,2
II	3,2
III	2,4
IV	2,0
V	2,1
VI	2,5



Obr. 32 Graf hodnot obsahu vzduchu v ČB

5.6. Příprava a ošetřování zkušebních těles

Pro zkoušky mechanických a chemických vlastností ztvrdlého betonu bylo nutné vytvořit zkušební tělesa pro tyto zkoušky:

- pevnost v tlaku – 6 x krychle
- odolnost proti průsaku tlakové vody – 2 x krychle
- odolnost proti působení vody a CH.R.L. – 2 x krychle

Celkem tedy bylo zapotřebí vytvořit 10 zkušebních krychlí z každé záměsi. Použity byly plastové formy (viz Obr. 33), jejich dno bylo utěsněno polystyrenem. Vnitřní stěny formy byly potřeny odformovacím olejem pro snadnější vyjmutí tělesa. Formy se naplnily

a zhutnily na vibračním stolku. Následně se uložily do větrané místnosti k počátečnímu zatvrdnutí.



Obr. 33 Forma pro přípravu zkušebního tělesa – krychle 150 x 150 x 150

Odformování těles neprobíhalo stejně pro všechny záměsi. Tělesa ze záměsí I, II, III a IV byla z forem vyjmuta již po 24 hodinách. Na tělesech IV. skupiny se však projevily známky brzkého odformování v důsledku pomalejší hydratace narůstajícího podílu GVS. Proto byly záměsi V a VI odformovány až po 96 hodinách, vyjma vzorků zkoušených na pevnost po 2 dnech, které byly vyjmuty z forem těsně před zkouškou. Tělesa, která byla ve formách ponechána déle, nebylo nutné speciálně ošetřovat. Díky nízkému obsahu cementu a vysokému obsahu GVS v nich nevznikalo příliš vysoké hydratační teplo. Všechna odformovaná tělesa byla následně označena a ponořena do vodní lázně (viz Obr. 34).



Obr. 34 Uložení zkušebních těles ve vodní lázni

6. Zkoušení ztvrdlého betonu

Tato kapitola je stěžejní částí bakalářské práce. Zabývá se ověřením mechanických a chemických vlastností ztvrdlého betonu, jakožto možného důkazu příznivého působení GVS na jeho výslednou kvalitu.

Na zkušebních tělesech byly předepsány a provedeny zkoušky stanovení pevnosti v tlaku, a to hned v několika obdobích zrání betonu, aby bylo možné sestavit průběh nárůstu pevnosti a porovnat rozdíly průběhu u jednotlivých záměsů. Dále byla provedena zkouška objemové hmotnosti ztvrdlého betonu, odolnosti proti průsaku tlakové vody a na závěr zkouška odolnosti proti vodě a CHRL. Zkušební tělesa nebyla před provedením zkoušek povrchově upravována.

6.1. Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu

Objemová hmotnost byla stanovována z rozměrů zkušebních těles a jejich hmotnosti. Postup zkoušky je předepsán normou ČSN EN 12390-7 [14]. Pro zjištění objemových hmotností všech šesti skupin vzorků I – VI byly použity pouze rozměry a hmotnosti zkušebních těles staří 28 dní.

Zkušební tělesa byla vyjmuta z vodní lázně a povrchově osušena. Dále byla ponechána na vzduchu přibližně 30 minut. Poté se krychle zvážily a změřily se všechny jejich rozměry, tj. šířka x šířka x výška, ze kterých se vypočítal objem jednotlivých těles V .

Objemová hmotnost byla vypočtena ze vztahu:

$$D = \frac{m}{V} \quad (14)$$

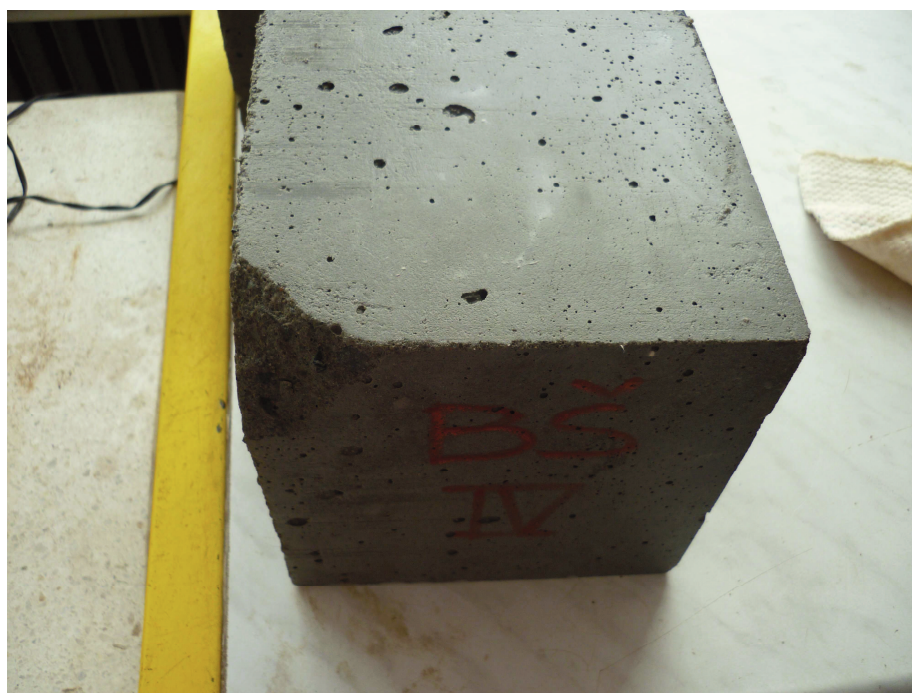
kde: D – objemová hmotnost zkušební tělesa [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

m – hmotnost zkušební tělesa [kg]

V – objem zkušební tělesa stanovený ze změřených rozměrů [m^3]

Výsledkem je průměr hodnot všech tří těles z každé skupiny vzorků. Pouze u skupiny IV, kde se projevilo porušení při předčasném odformování, bylo ze série vyjmuta

těleso IV - 28.2, které bylo poškozené (viz Obr. 35). Naměřené a vypočítané hodnoty, zaokrouhlené na nejbližších 10 kg.m^{-3} , jsou uvedeny v Tab. 25.

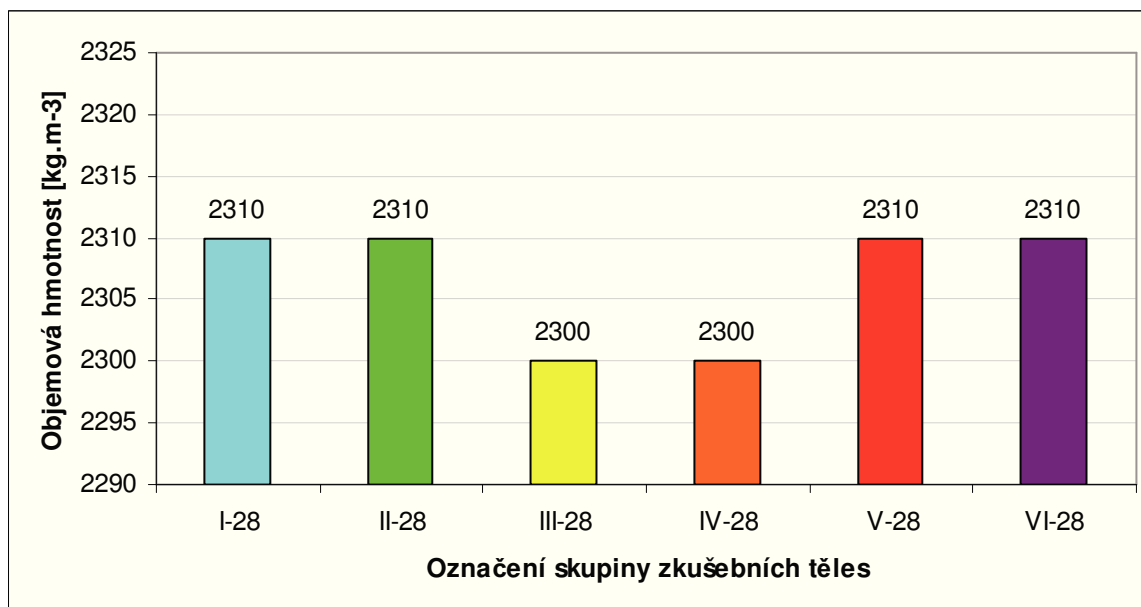


Obr. 35 Poškozené zkušební těleso IV-28.2

Tab. 25 Hodnoty objemových hmotností ztvrdlého betonu

Označení vzorku		Hmot- nost kg	Rozměry			Stáří dny	Objem $\times 10^{-3}$ m^3	Objemová hmotnost kg.m^{-3}	Průměr kg.m^{-3}
			Šířka mm	Šířka mm	Výška mm				
I-28	1	7,711	150	148	150	28	3,33000	2316	2310
	2	7,676	150	148	150		3,33000	2305	
	3	7,718	150	149	150		3,35250	2302	
II-28	1	7,686	150	148	149	28	3,30780	2324	2310
	2	7,719	150	149	150		3,35250	2302	
	3	7,677	150	148	150		3,33000	2305	
III-28	1	7,613	150	148	150	28	3,33000	2286	2300
	2	7,654	149	148	150		3,30780	2314	
	3	7,612	150	148	149		3,30780	2301	
IV-28	1	7,628	150	148	150	28	3,33000	2291	2300
	2	7,611	150	149	149		3,33015	2285	
	3	7,668	150	149	150		3,35250	2317	
V-28	1	7,669	150	148	150	28	3,33000	2303	2310
	2	7,730	150	148	150		3,33000	2321	
	3	7,705	150	149	150		3,35250	2298	
VI-28	1	7,720	150	148	150	28	3,33000	2318	2310
	2	7,878	152	150	150		3,42000	2304	
	3	7,640	150	147	150		3,30750	2310	

Zkušební těleso není do průměru započítáváno



Obr. 36 Graf průměrných objemových hmotností ztvrdlého betonu

6.2. Stanovení průběhu pevností betonu v tlaku

Postup zkoušky pro stanovení pevnosti v tlaku se řídí normou ČSN EN 12390-3 [13]. Jako zkušební zařízení byl použit zkušební lis soustavy DESTTEST 4310 COMPACT (viz Obr. 37). Pro zkušební tělesa byla zvolena zkušební období ve stáří 2, 7, 28 a 90 dnů. Zjišťována byla pouze krychelná pevnost.



Obr. 37 Soustava zkušebních lisů DESTTEST 4310 COMPACT

Počet zkoušených těles v závislosti na stáří vzorku byl zvolen:

- 1 x pevnost v tlaku ve stáří 2 dny
- 1 x pevnost v tlaku ve stáří 7 dní
- 3 x pevnost v tlaku ve stáří 28 dní
- 1 x pevnost v tlaku ve stáří 90 dní

Před započítáním zkoušky byla tělesa vyjmuta z vodní lázně, osušena, zvážena a byly změřeny jejich rozměry. Před vložením do lisu byla ponechána na vzduchu přibližně 45 až 60 minut. Tento postup se netýká zkušebních těles ze skupiny V a VI zkoušených ve stáří 2 dny. Tato tělesa byla zkoušena okamžitě po odformování.

Poté byla zkušební tělesa vložena do lisu, v němž byla zatěžována rychlostí 13,5 kN/s. Měřenou hodnotou byla maximální zatěžovací síla F ve chvíli porušení zkušebního vzorku. Pevnost v tlaku f_c byla zjišťována dodatečně výpočtem ze vztahu (15).

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (15)$$

kde: f_c – pevnost v tlaku [MPa]

F – maximální zatížení při porušení [N]

A_c – průřezová plocha zkušebního tělesa, na kterou působí zatížení v tlaku [mm²]



Obr. 38 Správné porušení vzorku

Po ukončení procesu zatěžování byla z těles odstraněna porušená část, to z důvodu kontroly správného způsobu (tvaru) porušení těles dle normy. Žádné ze zkušebních těles nebylo touto kontrolou ze série vyřazeno. Příklad správného porušení vzorku je uveden na Obr. 38.

Naměřené hodnoty a výsledky zkoušek jsou zaznamenány v Tab. 26 až 29 dle příslušného stáří vzorku. Pevnosti v tlaku jsou uváděny s přesností 0,1 MPa. Graf na Obr. 39 znázorňuje průběh nárůstu pevnosti v závislosti na čase.

Tab. 26 Pevnost betonu v tlaku – staří zkušebních těles 2 dny

Označení vzorku	Typ tělesa	Rozměry		Datum		Stáří	Síla	Pevnost
		Šířka	Šířka	výroby	zkoušení			
-	-	mm	mm	-	-	dny	kN	MPa
I-2	KR	150	149	3.5.11	5.5.11	2	284,1	12,7
II-2	KR	149	149	3.5.11	5.5.11		248,4	11,2
III-2	KR	150	147	9.5.11	11.5.11		225,9	10,2
IV-2	KR	149	148	9.5.11	11.5.11		158,0	7,2
V-2	KR	149	149	23.5.11	25.5.11		113,4	5,1
VI-2	KR	150	149	23.5.11	25.5.11		91,3	4,1

Tab. 27 Pevnost betonu v tlaku – staří zkušebních těles 7 dní

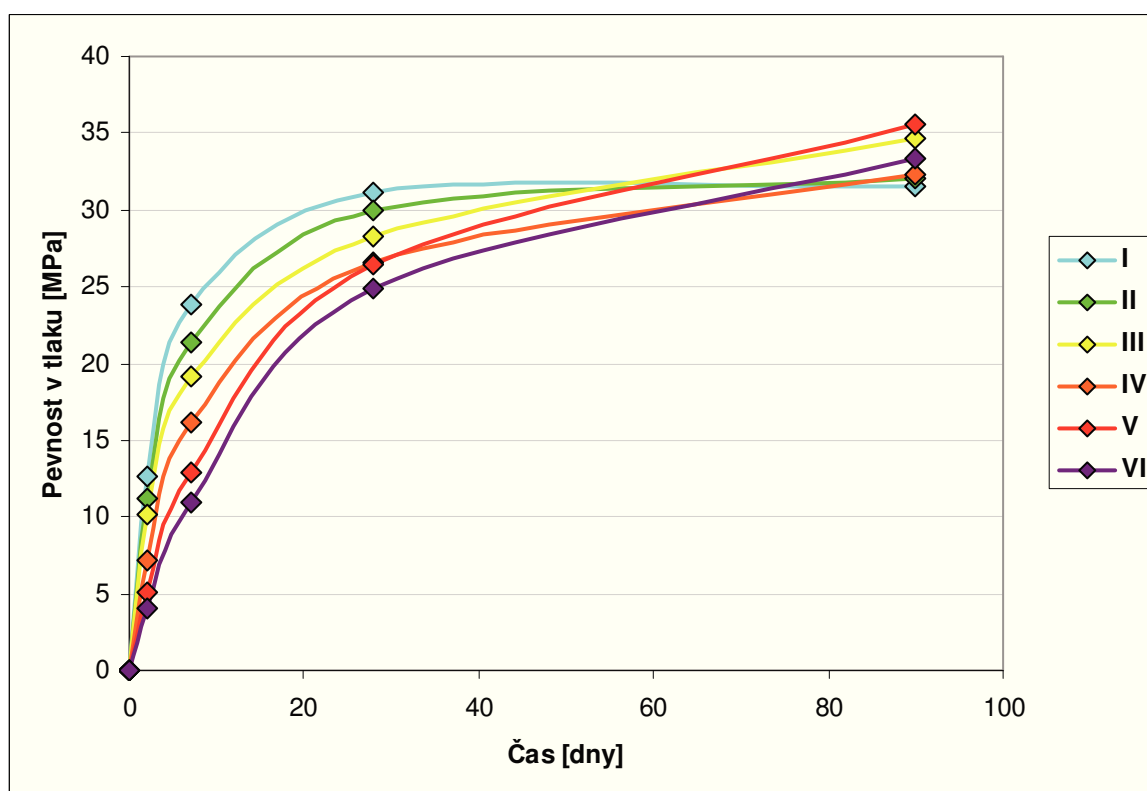
Označení vzorku	Typ tělesa	Rozměry		Datum		Stáří	Síla	Pevnost
		Šířka	Šířka	výroby	zkoušení			
-	-	mm	mm	-	-	dny	kN	MPa
I-7	KR	149	149	3.5.11	10.5.11	7	528,2	23,8
II-7	KR	151	149	3.5.11	10.5.11		482,3	21,4
III-7	KR	150	148	9.5.11	16.5.11		424,2	19,1
IV-7	KR	149	148	9.5.11	16.5.11		354,7	16,1
V-7	KR	150	150	23.5.11	30.5.11		284,5	12,9
VI-7	KR	149	149	23.5.11	30.5.11		243,8	11,0

Tab. 28 Pevnost betonu v tlaku – staří zkušebních těles 28 dní

Označení vzorku	Typ tělesa	-	Rozměry		Datum		Stáří	Síla	Pevnost	Průměr
			Šířka	Šířka	výroby	zkoušení				
-	-	-	mm	mm	-	-	dny	kN	MPa	MPa
I-28	1	KR	150	148	3.5.11	31.5.11	28	687,4	30,96	31,2
	2	KR	150	148	3.5.11	31.5.11		676,6	30,48	
	3	KR	150	149	3.5.11	31.5.11		718,8	32,16	
II-28	1	KR	150	148	3.5.11	31.5.11	28	664,8	29,95	30,0
	2	KR	150	149	3.5.11	31.5.11		642,4	28,74	
	3	KR	150	148	3.5.11	31.5.11		698,0	31,44	
III-28	1	KR	150	148	9.5.11	6.6.11	28	652,0	29,37	28,3
	2	KR	149	148	9.5.11	6.6.11		629,0	28,52	
	3	KR	150	148	9.5.11	6.6.11		599,0	26,98	
IV-28	1	KR	150	148	9.5.11	6.6.11	28	599,7	27,01	26,6
	2	KR	150	149	9.5.11	6.6.11		601,1	26,89	
	3	KR	150	149	9.5.11	6.6.11		582,0	26,04	
V-28	1	KR	150	148	23.5.11	20.6.11	28	590,2	26,58	26,5
	2	KR	150	148	23.5.11	20.6.11		580,0	26,13	
	3	KR	150	149	23.5.11	20.6.11		596,2	26,68	
VI-28	1	KR	150	148	23.5.11	20.6.11	28	561,9	25,31	24,9
	2	KR	152	150	23.5.11	20.6.11		563,6	24,72	
	3	KR	150	147	23.5.11	20.6.11		546,8	24,80	

Tab. 29 Pevnost betonu v tlaku – staří zkušebních těles 90 dní

Označení vzorku	Typ tělesa	Rozměry		Datum		Stáří	Síla	Pevnost
		Šířka	Šířka	výroby	zkoušení			
-	-	mm	mm	-	-	dny	kN	MPa
I-90	KR	150	149	3.5.11	10.5.11	90	705,79	31,5
II-90	KR	150	149	3.5.11	10.5.11		717,27	32,1
III-90	KR	150	148	9.5.11	16.5.11		768,50	34,6
IV-90	KR	150	147	9.5.11	16.5.11		711,94	32,3
V-90	KR	150	150	23.5.11	30.5.11		800,40	35,6
VI-90	KR	150	148	23.5.11	30.5.11		738,70	33,3



Obr. 39 Graf nárůstu pevnosti v tlaku v průběhu času

6.3. Stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou

Stanovení odolnosti průsaku tlakovou vodou bylo provedeno dle normy ČSN EN 12390-8 [15]. Zkoušku prováděla akreditovaná laboratoř BETOTECH, s.r.o. Pro zkoušku byla z každé skupiny odebrána dvě tělesa. Jejich stáří v době započetí zkoušky bylo 28 dní.

Zkušební tělesa byla umístěna do středu zkušebního zařízení (viz Obr. 40) tak, aby horní i spodní plocha byla hladká. Zároveň spodní zkoušená plocha nesměla být

znečištěná. Na těleso byl nepřetržitě po dobu 72 hodin vyvíjen tlak vody 500 ± 50 kPa. V průběhu zkoušky nebyl zaznamenán průsak vody mimo zkoušenou plochu. Po uplynutí zkušební doby byla tělesa vyjmuta, osušena a ve zkušebním lisu rozlomena tak, aby lom procházel středem zkoušené plochy. Lomová hrana vzorku byla rozdělena na dílky velikosti 1 cm. Poté byla změřena hloubka průsaku ve všech vyznačených bodech dělení. Tyto hodnoty jsou uvedeny v Tab. 30, kde je označena také maximální hloubka průsaku. Na Obr. 41 až 52 jsou znázorněny průběhy průsaku vody ve všech vzorcích.

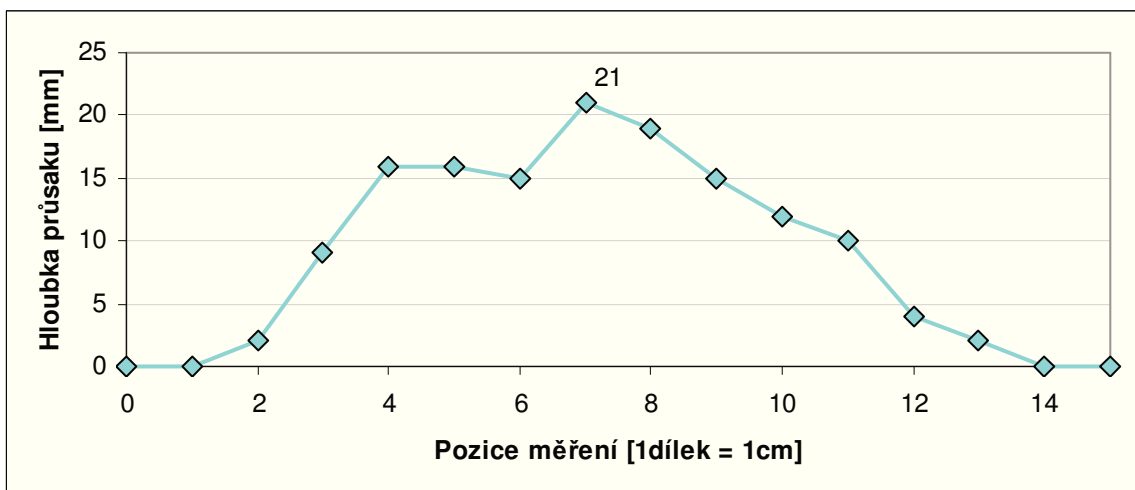


Obr. 40 Zkušební zařízení pro stanovení vodotěsnosti betonu

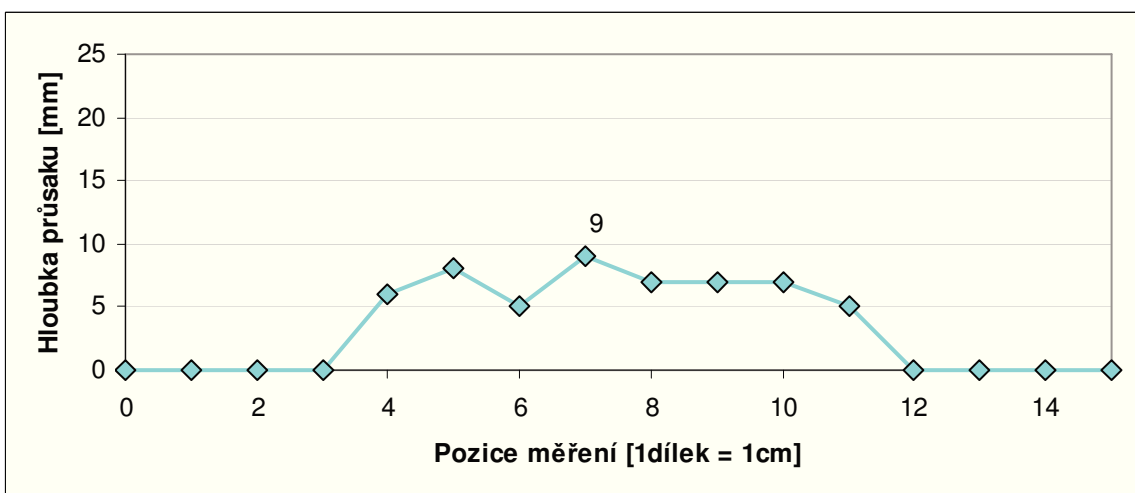
Tab. 30 Hodnoty hloubky průsaku tlakovou vodou

Označení vzorku		Hmot- nost	Pozice měření / Hloubka průsaku tlakovou vodou															
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
-	-	kg	mm															
I-A*	1	7,738	0	0	2	9	16	16	15	21	19	15	12	10	4	2	0	0
	2	7,751	0	0	0	0	6	8	5	9	7	7	7	5	0	0	0	0
II-A*	1	7,751	0	0	0	1	3	6	9	19	18	12	7	7	3	0	0	0
	2	7,752	0	0	0	2	4	7	6	7	6	9	5	4	2	0	0	0
III-A*	1	7,688	0	0	0	2	5	6	9	15	10	7	6	4	0	0	0	0
	2	7,668	0	0	0	0	2	5	7	6	9	7	8	5	3	0	0	0
IV-A*	1	7,669	0	0	0	3	4	5	7	8	5	9	8	8	2	0	0	0
	2	7,668	0	0	0	1	3	9	10	10	10	14	11	9	5	0	0	0
V-A*	1	7,682	0	0	0	0	1	2	3	6	4	2	1	0	0	0	0	0
	2	7,689	0	0	1	2	7	9	7	4	8	11	3	6	2	0	0	0
VI-A*	1	7,681	0	0	4	7	6	10	9	8	8	11	8	6	6	3	0	0
	2	7,700	0	0	0	0	1	2	3	6	8	4	2	4	1	1	0	0

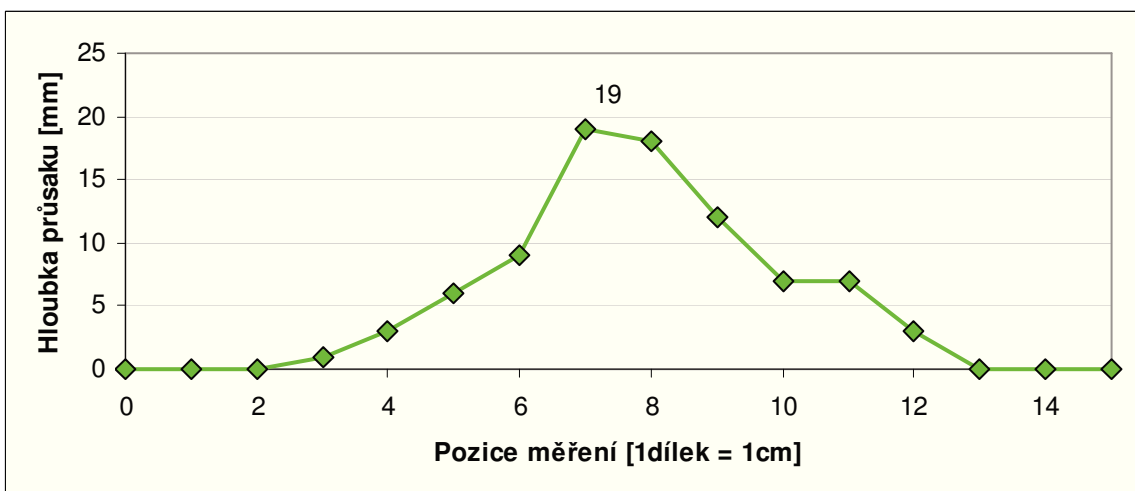
Maximální hodnota hloubky průsaku



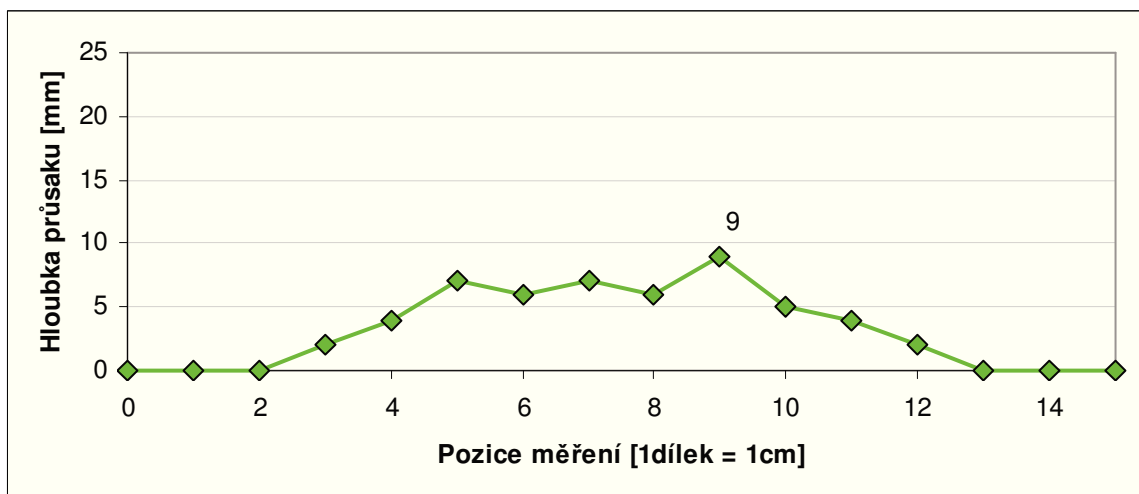
Obr. 41 Hloubka průsaku tlakové vody – zkušební těleso I-A.1



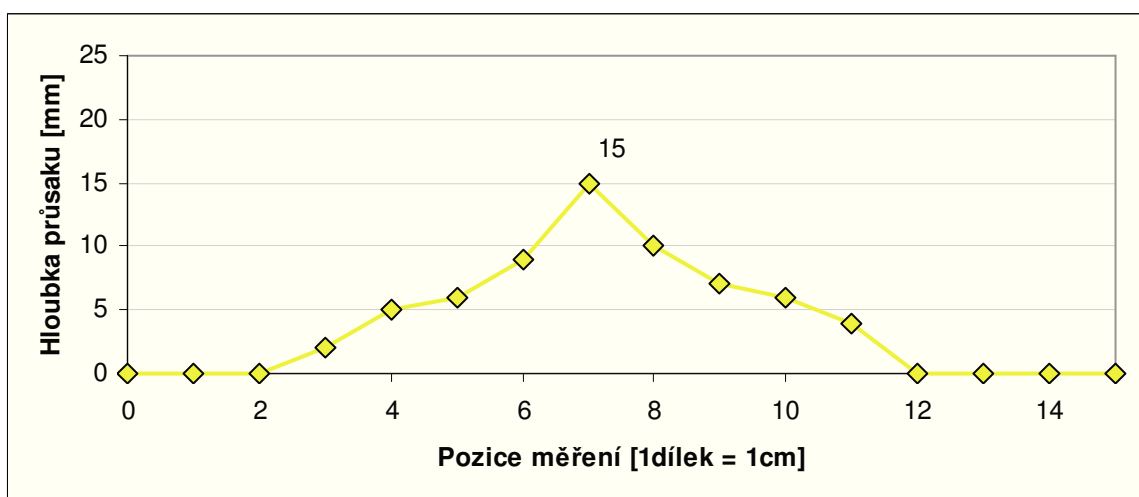
Obr. 42 Hloubka průsaku tlakové vody – zkušební těleso I-A.2



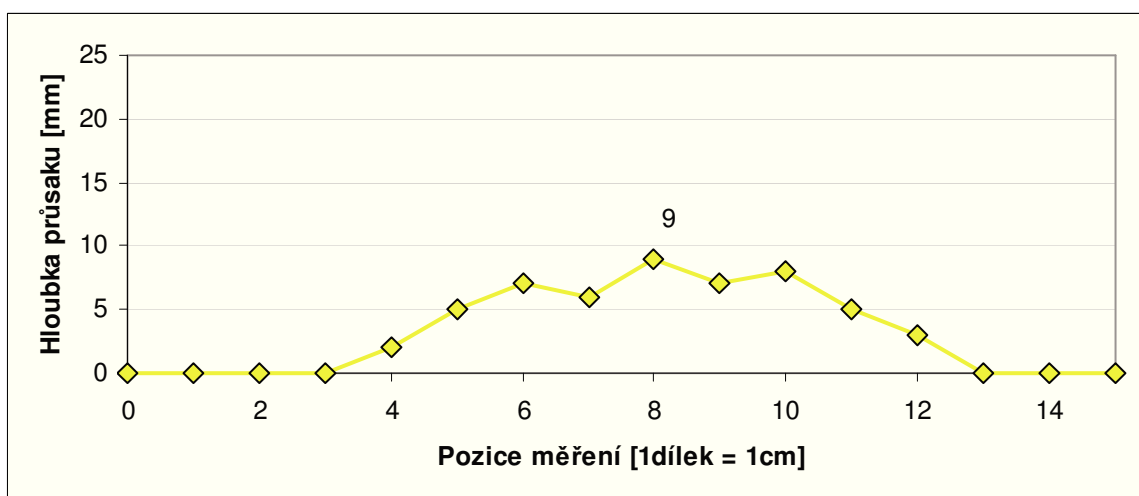
Obr. 43 Hloubka průsaku tlakové vody – zkušební těleso II-A.1



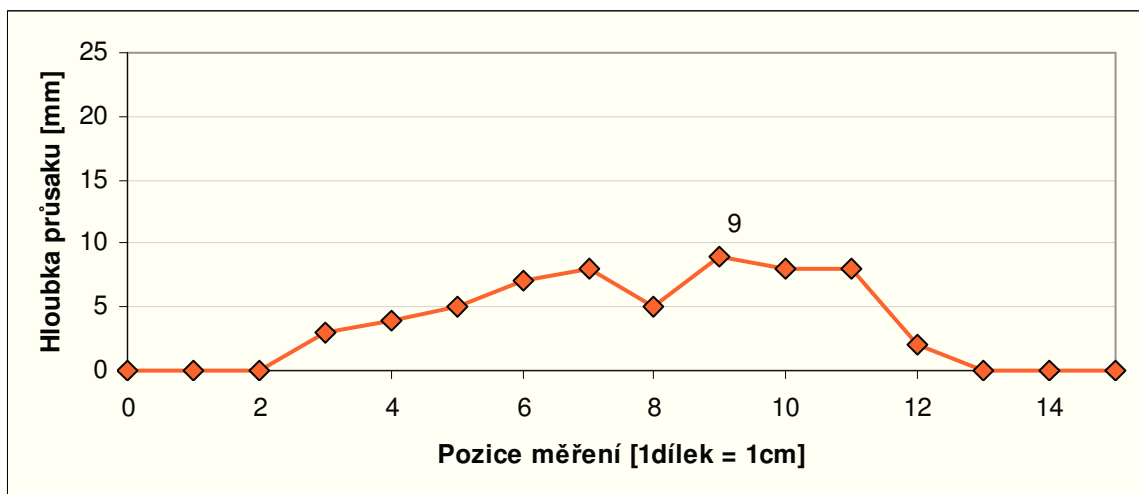
Obr. 44 Hloubka průsaku tlakové vody – zkušební těleso II-A.2



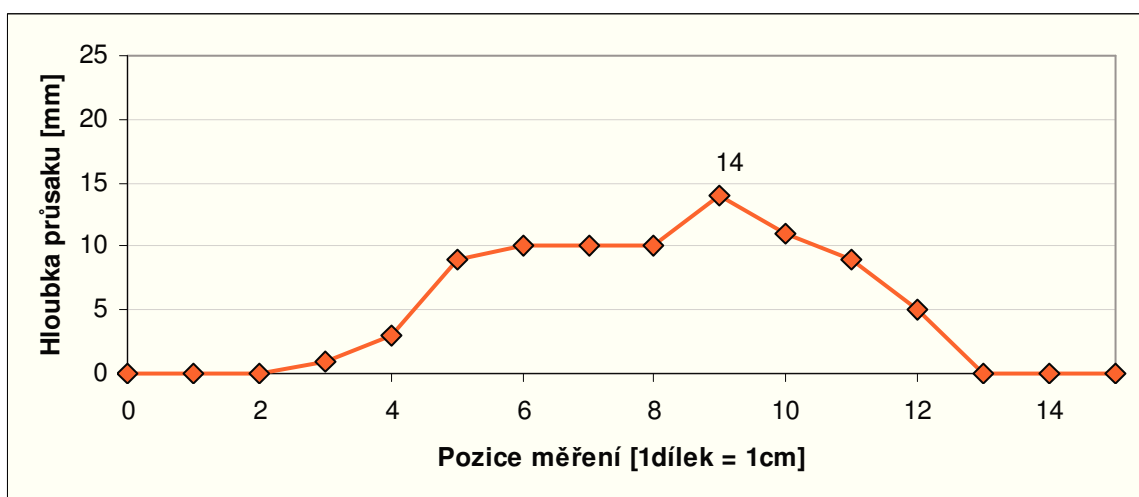
Obr. 45 Hloubka průsaku tlakové vody – zkušební těleso III-A.1



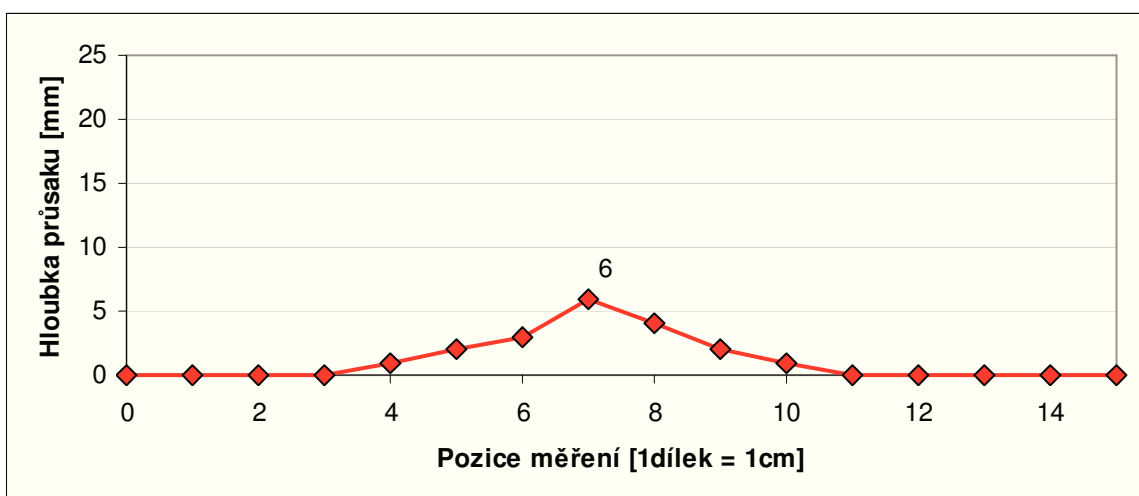
Obr. 46 Hloubka průsaku tlakové vody – zkušební těleso III-A.2



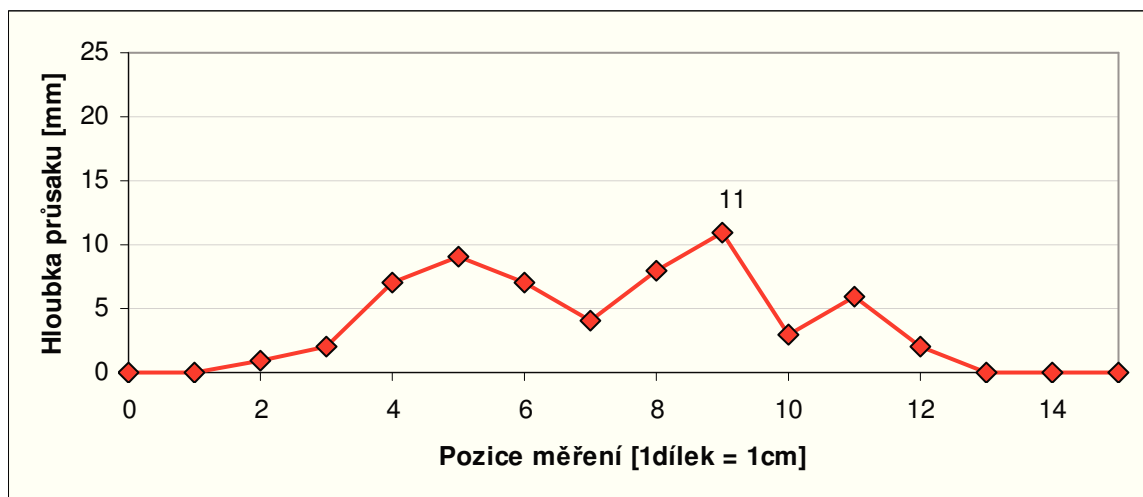
Obr. 47 Hloubka průsaku tlakové vody – zkušební těleso IV-A.1



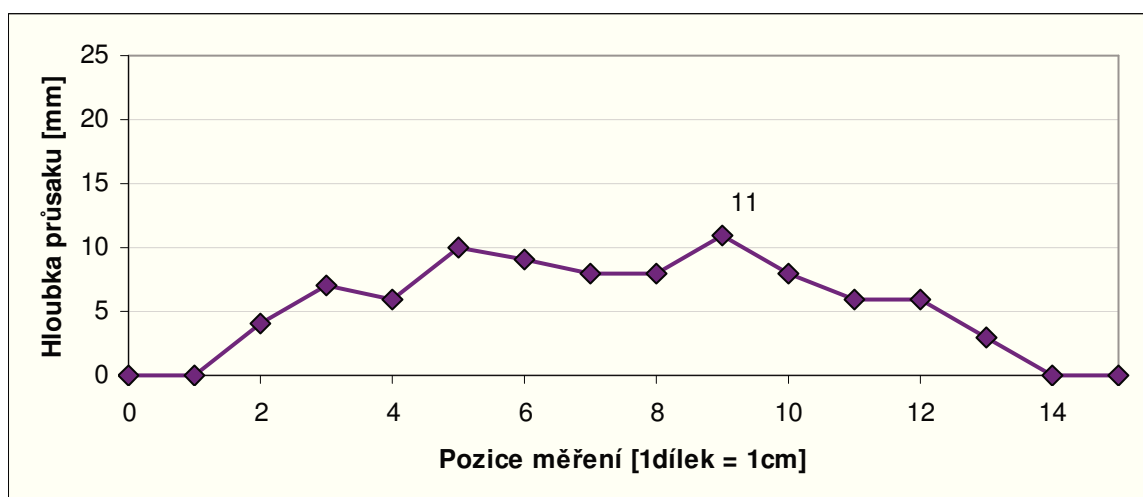
Obr. 48 Hloubka průsaku tlakové vody – zkušební těleso IV-A.2



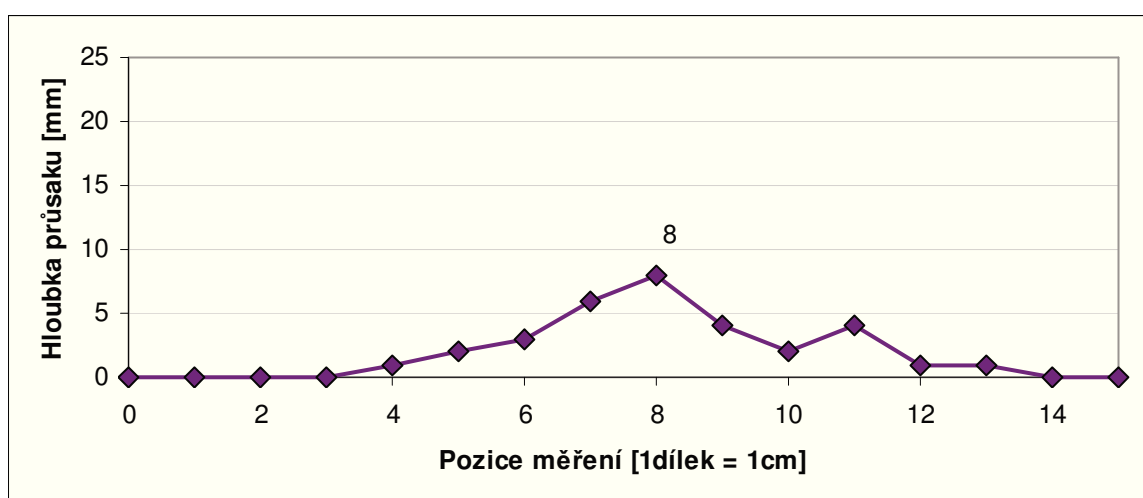
Obr. 49 Hloubka průsaku tlakové vody – zkušební těleso V-A.1



Obr. 50 Hloubka průsaku tlakové vody – zkušební těleso V-A.2



Obr. 51 Hloubka průsaku tlakové vody – zkušební těleso VI-A.1



Obr. 52 Hloubka průsaku tlakové vody – zkušební těleso VI-A.2

6.4. Stanovení odolnosti proti vodě a CHRL

Odolnost povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek byla stanovena na základě normy ČSN 73 1326 [9]. Zkoušku prováděla akreditovaná laboratoř BETOTECH, s.r.o.

Jako zkušební látka je pro tuto zkoušku využíván 3% roztok NaCl. Z každé zkušební skupiny byla odebrána dvě tělesa, jež byla v počátku zkoušky minimálního stáří 28 dní. Každé těleso bylo vloženo do korozivzdorné nádoby horním povrchem ke dnu a ponořeno do výšky 5 ± 1 mm ve výše uvedeném solném roztoku. Vzorky poté byly vloženy do cyklovacího zařízení.

V jednom cyklu se zkušební těleso zmrazuje a zpětně zahřívá v rozmezí teplot od -15 do $+20$ °C, přičemž proces ochlazení (resp. zahřátí) by měl trvat 45-50 minut. Těleso by také mělo být udržováno na nejnižší (resp. nejvyšší) teplotě po dobu 15 minut. Zařízení je nastavováno tak, aby cyklování ukončilo po každém 25. cyklu (resp. po předepsaném počtu cyklů).

Vždy po pětadvaceti cyklech se vzorky vyndaly z nádob a opatrně se očistily proudem vody ze stříčky tak, aby voda s nečistotami odtékala zpět do nádoby. Přebytečná voda byla opatrně odlita z nádoby, která byla následně umístěna do laboratorní sušičky. Zde byly odpady vysušeny do konstantní hmotnosti při teplotě 105 °C. Následně byly zváženy s přesností na 0,1 g.

Zkušební tělesa byla mezitím vložena opět do cyklovacího zařízení v miskách s novým solným roztokem. Tento postup měl být opakován do předepsaného počtu 150 cyklů nebo do překročení limitních hodnot odpadů. Z důvodů neočekávaně vysokých hodnot bylo provedeno pouze 2×25 cyklů pro každý zkušební vzorek.

Odolnost povrchu je stanovena jako množství odpadu na jednotku plochy, a to vztahem:

$$\rho_a = \frac{\Sigma m}{A} \quad (16)$$

kde: ρ_a – odolnost povrchu proti vodě a CHRL [$\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$]

Σm – součet všech hmotnostních odpadů od prvního do n-tého cyklu [g]

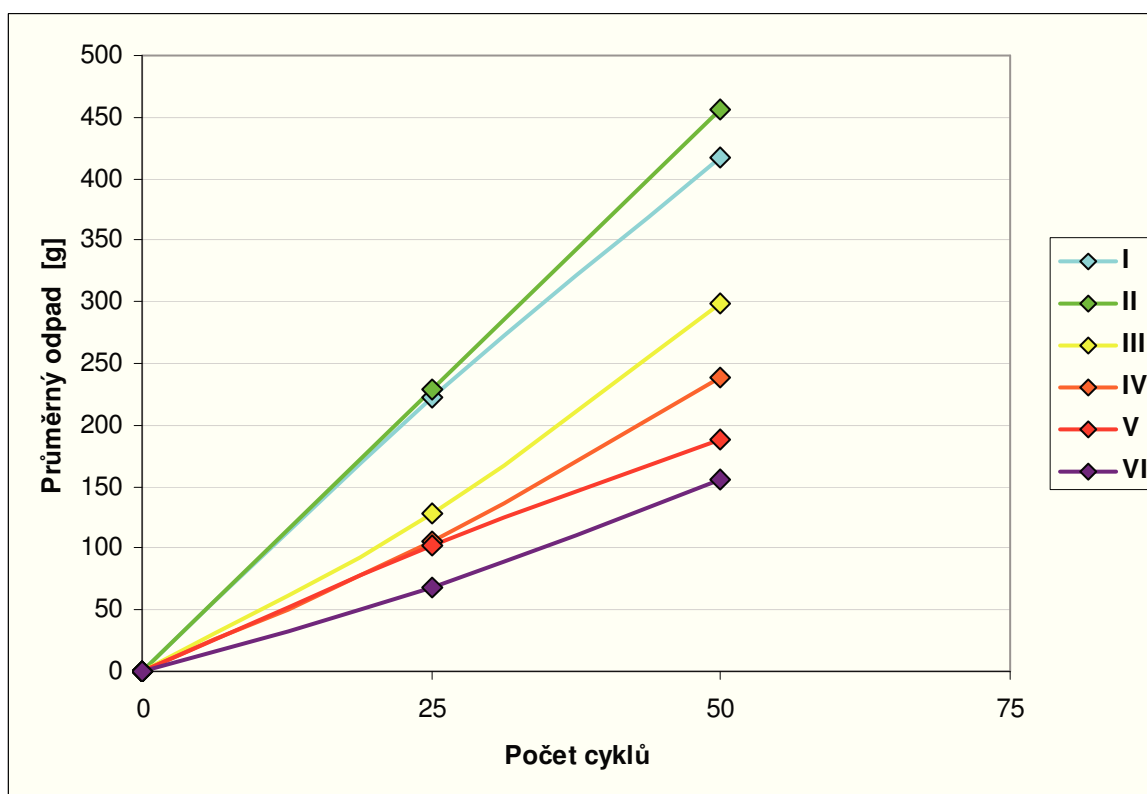
$A = 0,0255$ – velikost zkušební plochy [m^2]

Výsledné hodnoty odpadů a odolnosti proti vodě a chemickým rozmrazovacím látkám jsou uvedeny v Tab. 31.

Tab. 31 Naměřené hodnoty odpadů při stanovování odolnosti proti vodě a CHRL

Označení vzorku		Hmot- nost	počet cyklů / odpad; stupeň porušení (SP)								
			25			50			75		
-	-	kg	g	g/m²	SP	g	g/m²	SP	g	g/m²	SP
I-B**	1	7,706	191,8	7521,6	5	359,2	14086,3	5	-	-	-
	2	7,668	251,8	9874,5	5	475,6	18651,0	5	-	-	-
II-B**	1	7,655	235,0	9215,7	5	455,8	17874,5	5	-	-	-
	2	7,706	223,7	8772,5	5	457,7	17949,0	5	-	-	-
III-B*	1	7,590	113,1	4435,3	5	303,3	11894,1	5	-	-	-
	2	7,662	144,6	5670,6	5	295,2	11576,5	5	-	-	-
IV-B*	1	7,667	114,1	4474,5	5	253,6	9945,1	5	-	-	-
	2	7,537	96,6	3788,2	5	222,4	8721,6	5	-	-	-
V-B*	1	7,676	101,9	3996,1	5	187,4	7349,0	5	-	-	-
	2	7,642	103,3	4051,0	5	190,0	7451,0	5	-	-	-
VI-B*	1	7,571	70,1	2749,0	4	160,7	6302,0	5	-	-	-
	2	7,640	67,5	2647,1	4	150,7	5910,0	5	-	-	-

pozn.: *.Stáří vzorku 28 dní; **.Stáří vzorku 29 dní



Obr. 53 Průměrné množství odpadů v závislosti na počtu cyklů - CHRL

7. Vyhodnocení provedených experimentů

Cílem této kapitoly je vyhodnocení výsledků provedených zkoušek, ověření vlivu jemně mleté vysokopecní granulované strusky na užité vlastnosti betonu a posouzení podmínek jejího možného využití v technologii betonu.

Ověření pevnostních charakteristik cementu a strusky

Snížení obsahu pojiva v cementové maltě, připravené dle normy ČSN EN 196-1 [17], z množství 500 g (záměs **CEM 1**) na množství 400 g cementu CEM I 42,5R (záměs **CEM 2**) nepříznivě ovlivnilo hodnoty pevnosti v tlaku po 28 dnech. Pevnost v tlaku klesla o 20,1 %. Změna pevnosti v tahu ohybem se projevila mírným zvýšením.

Snížení obsahu pojiva ve struskové maltě, připravené dle normy ČSN EN 196-1 [17], z množství 500 g (záměs **SMŠ 1**) na množství 400 g strusky SMŠ 380 (záměs **SMŠ 2**) také nepříznivě ovlivnilo hodnoty pevnosti v tlaku po 28 dnech. Pevnost v tlaku poklesla 34,8 %. Změna pevnosti v tahu ohybem se projevila také mírným snížením.

Zkouškou bylo prokázáno, že zvýšením vodního součinitele dochází k nepříznivému ovlivnění zejména krátkodobých pevností v tlaku. Cementová malta staří 28 dní dosahuje výrazně vyšší, téměř dvojnásobné pevnosti v tlaku a oproti struskové maltě ji změna vodního součinitele ovlivňuje méně nepříznivě. Změny pevnosti v tahu ohybem nejsou příliš výrazné.

Zkoušky betonu

Všechny záměsi splňovali předepsanou konzistenci S4. Oproti návrhové hodnotě 2350 kg·m⁻³ se skutečná objemová hmotnost průměrně pohybovala okolo hodnoty 2310 kg·m⁻³. Obsah vzduchu byl stanoven v rozmezí 2 – 3,2 %.

Referenční záměs I (RZ) bez přidání strusky vykazovala nejvyšší krátkodobé pevnosti v tlaku. Pevnost v tlaku po 2 dnech dosáhla hodnoty 12,7 MPa, po 7 dnech 23,8 MPa, po 28 dnech 31,2 MPa. Dlouhodobá pevnost v tlaku dále vzrůstala jen pozvolna, po 90 dnech dosáhla hodnoty 31,5 MPa. Nepříznivých hodnot dosáhla hloubka průsaku tlakovou vodou. Maximální průsak byl naměřen 21 mm. Velmi nepříznivě se projevila odolnost proti vodě a CHRL. U záměsi I tato zkouška vykazuje jistou odchylku. Zatímco u záměsí II – VI se hodnoty odpadů u obou zkušebních těles téměř rovnají, těleso I-B.1 vykazovalo mnohem nižší odpady než I-B.2. Těleso I-B.1 by pravděpodobně při větším počtu

zkušebních těles nebylo započítáváno do průměru. Lze jej tedy považovat za statistickou náhodu.

Záměs II s obsahem strusky 6,67 % z celkového množství pojiva vykázala oproti RZ mírné snížení krátkodobých pevností v tlaku. Pevnost v tlaku po 2 dnech se snížila o 11,8 % oproti RZ, v 7 dnech se snížila o 10 %. Snížení pevnosti v tlaku po 28 dnech nepřesáhlo hodnotu 4 %. Takto nízký přírůstek strusky tedy nemá na 28denní pevnost v tlaku příliš velký vliv a je možné ho zanedbat. 90denní pevnost dosahuje hodnoty, která je jen o 2 % vyšší než u RZ. Zkouška odolnosti proti průsaku tlakovou vodou nezaznamenala žádné výrazné zlepšení. Maximální naměřená hodnota byla 19 mm. Odolnost proti vodě a CHRL zaznamenala mírné zhoršení. Toto zvýšení průměrného množství odpadu lze odůvodnit tvrzením uvedeným ve vyhodnocení RZ (viz předchozí odstavec).

Záměs III s obsahem strusky 20 % z celkového množství pojiva vykázala oproti referenční záměsi mírné snížení krátkodobých pevností v tlaku. Pevnost v tlaku po 2 i 7 dnech se snížila o 19,7 % oproti RZ. Snížení pevnost v tlaku po 28 dnech dosáhlo hodnoty 9,3 %. 90denní pevnost dosahuje hodnoty, která je jen o 9,8 % vyšší než u RZ. Zkouška odolnosti proti průsaku tlakovou vodou zaznamenala mírné zlepšení. Maximální naměřená hodnota byla 15 mm. Odolnost proti vodě a CHRL zaznamenala výrazné zlepšení. Průměrné množství odpadu se snížilo přibližně o třetinu oproti RZ.

Záměs IV s obsahem strusky 33,33 % z celkového množství pojiva vykázala oproti referenční záměsi výrazné snížení krátkodobých pevností v tlaku. Pevnost v tlaku po 2 dnech se snížila o 43,3 % oproti RZ, v 7 dnech se snížila o 32,4 %. Snížení pevnosti v tlaku po 28 dnech dosáhlo hodnoty 14,7 %. 90denní pevnost dosahuje hodnoty, která je jen o 2,5 % vyšší než u RZ. Zkouška odolnosti proti průsaku tlakovou vodou zaznamenala mírné zlepšení. Maximální naměřená hodnota byla 14 mm. Odolnost proti vodě a CHRL zaznamenala výrazné zlepšení. Průměrné množství odpadu se snížilo přibližně o 40 % oproti RZ.

Záměs V obsahuje 46,67 % strusky z celkového množství pojiva. Tato záměs měla výrazně vyšší hodnotu sednutí kužele 190 mm, avšak spadá stále do kategorie konzistence S4. Pravděpodobnou příčinou je zvýšené množství vody v přidaném kamenivu. Zvýšení vodního součinitele pravděpodobně zapříčinilo také mírné navýšení dlouhodobých pevností. Tato záměs vykázala oproti referenční záměsi výrazné snížení krátkodobých pevností v tlaku. Pevnost v tlaku po 2 dnech se snížila o 59,8 % oproti RZ, v 7 dnech se snížila o 45,8 %. Snížení pevnosti v tlaku po 28 dnech dosáhlo hodnoty 15,1 %. Zde se projevilo navýšení pevností. Pevnost v tlaku po 28 dnech je téměř shodná se záměsí IV. 90denní pevnost

dosahuje nejvyšší naměřené hodnoty ze všech záměsů 35,6 MPa, tj. o 13 % více než u RZ. Zkouška odolnosti proti průsaku tlakovou vodou zaznamenala výrazné zlepšení. Maximální naměřená hodnota byla 11 mm a je shodná s hodnotou průsaku u záměsi VI. Odolnost proti vodě a CHRL zaznamenala velmi výrazné zlepšení. Průměrné množství odpadu se snížilo přibližně o 55 % oproti RZ.

Záměs VI s obsahem strusky 60 % z celkového množství pojiva vykázala oproti referenční záměsi výrazné snížení krátkodobých pevností v tlaku. Pevnost v tlaku po 2 dnech se snížila o 67,7 % oproti RZ, v 7 dnech se snížila o 53,8 %. Snížení pevnosti v tlaku po 28 dnech dosáhlo hodnoty 20,2 %. 90denní pevnost dosahuje hodnoty, která je jen o 5,7 % vyšší než u RZ. Zkouška odolnosti proti průsaku tlakovou vodou zaznamenala výrazné zlepšení. Maximální naměřená hodnota byla 11 mm. Odolnost proti vodě a CHRL zaznamenala velmi výrazné zlepšení. Průměrné množství odpadu se snížilo o 63 % oproti RZ.

Tab. 32 Porovnání výsledků s referenčním betonem

Označení záměsi	Pevnost v tlaku				Odolnost proti průsaku	CHRL
	2 dny	7 dní	28 dní	90 dní		
I	0	0	0	0	0	0
II	-	-	0	0	0	-
III	-	-	-	+	+	++
IV	--	--	-	+	+	++
V	--	--	-	++	++	++
VI	--	--	--	+	++	++

pozn.: ++..výrazně kladný vliv; +..kladný vliv; 0..nemá vliv; -..záporný vliv; --..výrazně záporný vliv

Zkouškami bylo prokázáno, že beton s přidavkem vysokopecní granulované strusky dosahuje srovnatelných dlouhodobých pevností v tlaku, ale výrazně nižších pevností krátkodobých. Velmi pozitivně však zvyšující se přidavek strusky ovlivňuje hloubku průsaku tlakovou vodou, jež se snížila téměř na polovinu oproti referenčnímu cementovému betonu, a také odolnost proti vodě a CHRL, jejíž průměrné hodnoty odpadů se snížily téměř o dvě třetiny.

Je prokázána také použitelnost strusky v široké škále poměrů k cementu, včetně schopnosti tuhnout a tvrdnout i bez přidání cementu.

8. Závěr

Tato práce prokázala výhody využití granulované vysokopecní strusky (GVS) jako latentně hydraulického pojiva. Beton s přidavkem strusky dosáhl stejných nebo vyšších dlouhodobých pevností, ale podstatně nižších pevností krátkodobých. Odolnost proti průsaku tlakovou vodou a zejména odolnost proti vodě a CHRL vykazaly velmi výrazné zlepšení. Výsledky byly porovnávány s referenční záměsí bez obsahu GVS.

Jedinou prokazatelnou nevýhodou pro využití v praxi je delší technologická přestávka pro tuhnutí a tvrdnutí betonu, jelikož GVS má nízké počáteční pevnosti. V praxi je možné také využití těchto betonů pro masivnější konstrukce, jelikož je zde vzhledem k pomalejší hydrataci předpoklad nižšího hydratačního tepla.

Součástí laboratorních testů bylo určení parametrů čerstvého betonu, případně jejich porovnání s předpokládanými či požadovanými hodnotami. Předepsaný požadavek na konzistenci byl splněn u všech připravených receptur. Příprava a zkoušky čerstvého betonu byly prováděny v Laboratoři stavebních hmot FAST VŠB-TU Ostrava.

Porovnáním všech výsledků zkoušek ztvrdlého betonu bylo dosaženo závěru, že se zvyšujícím se množstvím podílu strusky se zvyšovala odolnost proti agresivnímu prostředí i proti průsaku tlakové vody. V tomto ohledu byla nejlépe vyhodnocena záměs VI, tedy záměs s nejvyšším, nadpolovičním podílem strusky. Při zvyšování podílu strusky se předpokládá stejný pozitivní vývoj těchto vlastností. Se zvyšujícím se podílem strusky se průběh nárůstu pevnosti v tlaku v závislosti na čase pomalu přibližoval lineárnímu. Oproti referenční záměsí I se s narůstajícím podílem GVS snižovaly pevnosti ve 2, 7 a 28 dnech, zatímco pevnosti v tlaku v 90 dnech dosáhly mírně vyšších hodnot než referenční záměs. Zkoušky odolnosti proti průsaku tlakové vody a odolnosti proti vodě a CHRL prováděla laboratoř Betotech, s.r.o. Zkoušky pevnosti v tlaku byly prováděny v Laboratoři stavebních hmot FAST VŠB-TU Ostrava.

Velmi zásadními faktory, které hovoří, ve prospěch strusky jsou nižší energetická a finanční náročnost, než v případě nejžádanějšího pojiva – cementu, jelikož se jedná o odpadní materiál z hutní výroby a další zpracování není příliš finančně náročné.

Seznam použité literatury

- [1] Adámek, J., Novotný, B., Koukal, J.: *Stavební materiály*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 1997
- [2] Aïtcin, P.-C.: *Vysokohodnotný beton*. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2005
- [3] Brož, L.: *Výroba surového železa I. část*. Ostrava: Ediční středisko VŠB v Ostravě, 1964
- [4] Brož, L.: *Výroba surového železa II. část*. Ostrava: Ediční středisko VŠB v Ostravě, 1964
- [5] Brož, L.: *Výroba surového železa III. část*. Ostrava: Ediční středisko VŠB v Ostravě, 1966
- [6] Brož, L. a kol.: *Hutnictví železa*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1988
- [7] Brož, L., Bilík, J., Kret, J.: *Vysokopeční výroba železa*. Ostrava: VŠB v Ostravě, 1985
- [8] Collepardi, M.: *Moderní beton*. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2009
- [9] ČSN 73 1326: *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1984
- [10] ČSN EN 12350-2: *Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím*. Praha: ÚNMZ, 2009
- [11] ČSN EN 12350-6: *Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost*. Praha: ÚNMZ, 2009
- [12] ČSN EN 12350-7: *Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody*. Praha: ÚNMZ, 2009
- [13] ČSN EN 12390-3: *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: ÚNMZ, 2009
- [14] ČSN EN 12390-7: *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: ÚNMZ, 2009
- [15] ČSN EN 12390-8: *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou*. Praha: ÚNMZ, 2009
- [16] ČSN EN 12620+A1: *Kamenivo do betonu*. Český normalizační institut, 2008
- [17] ČSN EN 196-1: *Metody zkoušení cementu - Část 1: Stanovení pevnosti*. Český normalizační institut, 2005

- [18] ČSN EN 197-1: *Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Český normalizační institut, 2001
- [19] ČSN EN 206-1: *Beton - Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Český normalizační institut, 2001
- [20] Dohnálek, J., Seidlerová, I.: *Dějiny betonového stavitelství v českých zemích do konce 19. století*. Praha: Informační centrum ČKAIT, 1999
- [21] Fečko, P., Kušnierová, M., Lyčková, B., Čablík, V., Farkašová, A.: *Popílky*; Ostrava; VŠB-TUO, 2003
- [22] <http://www.heidelbergcement.cz/>
- [23] <http://www.stachema.cz/>
- [24] Krumnikl, F., Makarius, M., Šeffl, L.: *Výroba oceli*; Praha; Státní nakladatelství technické literatury, 1964
- [25] Kurdowski, W.: *Chemia cementu i betonu*. Kraków: Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2010
- [26] Pavlíková, M.: *Alternativní silikátové pojivo pro beton*, časopis *Stavitel*. Praha: *Economia, a.s.*, 2008 (str. 42-43)
- [27] *Příručka technologa BETON: Suroviny – Výroba – Vlastnosti*. Českomoravský beton, 2010 (1. vydání)
- [28] Ptíčen, F., Vavro, M., Nožička, T., Šustek, P., Boháčová, J., Bujdoš, D.: *Metakaolíny připravené z kaolínů s odlišným mineralogickým a zrnitostním složením*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010
- [29] Pytlík, P.: *Technologie betonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1997
- [30] Svoboda, L. a kolektiv: *Stavební hmoty*. Bratislava: JAGA GROUP, s.r.o., 2007

Seznam tabulek

- Tab. 1 Sítový rozbor kameniva Bieńkowice 0/2
- Tab. 2 Sítový rozbor kameniva Tovačov 0/4
- Tab. 3 Vlastnosti kameniva Tovačov 0/4
- Tab. 4 Sítový rozbor kameniva Hrabůvka 8/16
- Tab. 5 Vlastnosti kameniva Hrabůvka 8/16
- Tab. 6 Součet křivek zrnitosti
- Tab. 7 Fyzikální vlastnosti cementu WARTA CEM I 42,5R-NA
- Tab. 8 Chemická analýza cementu WARTA CEM I 42,5R-NA
- Tab. 9 Typické chemické složení portlandského cementu, pucolánu, popílku, křemičitého úletu a strusky
- Tab. 10 Chemické vlastnosti a míra rozlití metakaolínů vyráběných z jemnozrnných plavených kaolínů (typické hodnoty)
- Tab. 11 Chemické vlastnosti a míra rozlití metakaolínů vyráběných ze středně hrubozrnných až hrubozrnných kaolínů, popř. jílu (typické hodnoty)
- Tab. 12 Chemické složení zásaditých struskotvorných přísad
- Tab. 13 Teploty tavení struskotvorných oxidů a jejich sloučenin
- Tab. 14 Výsledky rozboru SMŠ 380
- Tab. 15 Receptury malt pro přípravu zkušebních těles
- Tab. 16 Pevnost v tahu ohybem – trámečky
- Tab. 17 Pevnost v tlaku – trámečky
- Tab. 18 Podíly použitých pojiv
- Tab. 19 Složení návrhové receptury [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
- Tab. 20 Složení návrhové receptury pro objem 40 l
- Tab. 21 Skutečné složení receptury pro objem 40 l
- Tab. 22 Zkouška sednutí kužele
- Tab. 23 Hodnoty objemových hmotností ČB
- Tab. 24 Hodnoty obsahu vzduchu v ČB
- Tab. 25 Hodnoty objemových hmotností ztvrdlého betonu
- Tab. 26 Pevnost betonu v tlaku – staří zkušebních těles 2 dny
- Tab. 27 Pevnost betonu v tlaku – staří zkušebních těles 7 dní

Tab. 28 Pevnost betonu v tlaku – staří zkušebních těles 28 dní

Tab. 29 Pevnost betonu v tlaku – staří zkušebních těles 90 dní

Tab. 30 Hodnoty hloubky průsaku tlakovou vodou

Tab. 31 Naměřené hodnoty odpadů při stanovování odolnosti proti vodě a CHRL

Tab. 32 Porovnání výsledků s referenčním betonem

Seznam obrázků

- Obr. 1 Mapa těžebních oblastí použitých kameniv (<http://maps.google.cz/>)
- Obr. 2 Křivka zrnitosti kameniva Bieńkowice 0/2
- Obr. 3 Křivka zrnitosti kameniva Tovačov 0/4
- Obr. 4 Kamenolom Hrabůvka (<http://www.betonserver.cz/cms-hrabuvka>)
- Obr. 5 Křivka zrnitosti kameniva Hrabůvka 8/16
- Obr. 6 Výsledná součtová křivka zrnitosti
- Obr. 7 Vliv urychlovače tuhnutí (s) a tvrdnutí (h) na stupeň hydratace (α) a pevnost v tlaku (f) ve srovnání s referenčním betonem (c)
- Obr. 8 Pozice hydraulických a pucolánových látek v potrojném diagramu $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Fe_2O_3) (Rankin)
- Obr. 9 Produkce odpadů z energetického zpracování uhlí v EU v roce 2000
- Obr. 10 Využití popílků ve stavebnictví
- Obr. 11 Chemické reakce v peci při výrobě křemíku
- Obr. 12 Zaplnění prostorů mezi zrny cementu křemičitým úletem (H. Bache)
- Obr. 13 Schéma vysoké pece (http://leccos.com/pics/pic/pec_vysoka.jpg)
- Obr. 14 Pojízdný nosič na přepravu surového železa
- Obr. 15 Strusková pánev
- Obr. 16 Polosuché granulační zařízení
- Obr. 17 Proces chlazení strusky (závod Vysoké pece společnosti ArcelorMittal Ostrava)
- Obr. 18 Laboratorní míchačka BS MI-CM5A (<http://www.betonsystem.cz/>)
- Obr. 19 Časové schéma míchání (<http://www.betonsystem.cz/>)
- Obr. 20 Forma pro přípravu zkušebních těles – trámeček
- Obr. 21 Skříň pro vlhké uložení trámeček BS VLH-203 (<http://www.betonsystem.cz/>)
- Obr. 22 Schéma umístění zkušební tělesa ve zkušebním lisu
- Obr. 23 Porušená zkušební tělesa
- Obr. 24 Průměrné hodnoty pevnosti v tahu ohybem – trámečky
- Obr. 25 Průměrné hodnoty pevnosti v tlaku – trámečky
- Obr. 26 Poměr cement / struska
- Obr. 27 Kontrola čerstvého betonu před přidáním plastifikátoru
- Obr. 28 Parametry zkoušky sednutí kužele

- Obr. 29 Graf hodnot sednutí kužele
- Obr. 30 Zkušební zařízení pro stanovení obsahu vzduchu v ČB – Form+Test Prüfsysteme
(<http://www.formtest.de/>)
- Obr. 31 Graf hodnot objemových hmotností ČB
- Obr. 32 Graf hodnot obsahu vzduchu v ČB
- Obr. 33 Forma pro přípravu zkušebního tělesa – krychle 150 x 150 x 150
- Obr. 34 Uložení zkušebních těles ve vodní lázni
- Obr. 35 Poškozené zkušební těleso IV-28.2
- Obr. 36 Graf průměrných objemových hmotností ztvrdlého betonu
- Obr. 37 Soustava zkušebních lisů DESTTEST 4310 COMPACT
- Obr. 38 Správné porušení vzorku
- Obr. 39 Graf nárůstu pevnosti v tlaku v průběhu času
- Obr. 40 Zkušební zařízení pro stanovení vodotěsnosti betonu (<http://www.briohranice.cz/>)
- Obr. 41 Hloubka průsaku tlakové vody– zkušební těleso I-A.1
- Obr. 42 Hloubka průsaku tlakové vody – zkušební těleso I-A.2
- Obr. 43 Hloubka průsaku tlakové vody – zkušební těleso II-A.1
- Obr. 44 Hloubka průsaku tlakové vody – zkušební těleso II-A.2
- Obr. 45 Hloubka průsaku tlakové vody – zkušební těleso III-A.1
- Obr. 46 Hloubka průsaku tlakové vody – zkušební těleso III-A.2
- Obr. 47 Hloubka průsaku tlakové vody – zkušební těleso IV-A.1
- Obr. 48 Hloubka průsaku tlakové vody – zkušební těleso IV-A.2
- Obr. 49 Hloubka průsaku tlakové vody – zkušební těleso V-A.1
- Obr. 50 Hloubka průsaku tlakové vody – zkušební těleso V-A.2
- Obr. 51 Hloubka průsaku tlakové vody – zkušební těleso VI-A.1
- Obr. 52 Hloubka průsaku tlakové vody – zkušební těleso VI-A.2
- Obr. 53 Průměrné množství odpadů v závislosti na počtu cyklů - CHRL